

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Měření hysterézní smyčky feromagnetika pomocí osciloskopu -
laboratorní úloha.**

Ferromagnetic Hysteresis Loop Measurement Using the Oscilloscope - Laboratory Exercise

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Sonnenschein**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: Měření hysterézní smyčky feromagnetika pomocí osciloskopu -
laboratorní úloha
Ferromagnetic Hysteresis Loop Measurement Using the Oscilloscope -
Laboratory Exercise

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s principy měření hysterézní smyčky magnetických obvodů.
2. Návrh koncepce úloh pro výuku měření hysterézní smyčky feromagnetika.
3. Návrh přípravku s různými magnetickými obvody pro měření s osciloskopem.
4. Realizace navrženého přípravku pro laboratorní výuku.
5. Oživení a testování realizovaného měřicího přípravku.
6. Vytvoření úloh pro měření hysterézní smyčky feromagnetika pomocí osciloskopu.
7. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody: ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdné elektrotechnice*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika III*. 5. vyd. Praha: Informatorium, 2005. 291 s. ISBN 80-7333-045-8.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 248 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [5] HAVLÍK, Ladislav. *Osciloskopy a jejich použití*. 1. vyd. Praha: nakladatelství Sdělovací technika, 2002. 254 s. ISBN 80-901936-8-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Kašík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6.5.2013

Podpis 

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, kterým byl Ing. Vladimír Kašík, Ph.D, za vhodnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování této bakalářské práce a za zajištění podmínek pro měření.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá měřením hysterézní smyčky pomocí osciloskopu. Hysterézní smyčka vyjadřuje grafickou závislost intenzity magnetického pole na magnetické indukci. Hlavní výhodou použití osciloskopu je grafické zobrazení hysterézní smyčky a grafická názornost. Měřené předměty jsou různých materiálů a tvarů.

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh, realizace a popis přípravku, pomocí kterého se bude provádět měření hysterézní smyčky. Přípravek se bude skládat z několika bloků. Prvním blokem je výkonový zesilovač, který zesiluje signál z generátoru signálu. Zesílený signál se přivádí na primární vinutí, kde vzniká magnetické pole o dané intenzitě.

Dále je v práci řešen návrh integrátoru, který slouží k integraci sekundárního napětí.

V práci je uvedeno blokové schéma a propojení jednotlivých částí, tak jak bylo navrženo. Na konci práce jsou uvedeny dosažené výsledky měření a jejich popis.

Abstract:

This thesis deals with the measurement of the hysteresis loop by using an oscilloscope. Hysteresis loop expresses graphical dependence of the intensity of magnetic field on the magnetic induction. The main advantage of using the oscilloscope is graphical displaying of the hysteresis loop and a graphical illustration. Measured objects are different kinds of materials and shapes.

The main aim of this thesis is the design, implementation and description of the preparation, which is used by measuring the hysteresis loop. The preparation consists of several blocks. A power amplifier is the first block, which amplifies the signal from the signal generator. The amplified signal is lead to primary winding, where a magnetic field on a given intensity is created.

Next the design solutions of integrator, which is used to integrate the secondary voltage is solved in this thesis.

This thesis presents block diagram and connections between parts, as has been designed. The results of measurements and their description are presented at the end of the thesis.

Klíčová slova:

Intenzita magnetického pole, magnetická indukce, hysterézní smyčka, integrační článek, zesilovač.

Key word:

Intensity of the magnetic field, magnetic induction, hysteresis loop, integrator, amplifier.

Seznam použitých symbolů a zkratek:

B	Magnetická indukce	[T]
B_{max}	Maximální magnetická indukce	[T]
B_r	Remanentní magnetická indukce	[T]
H	Intenzita magnetického pole	[A*m ⁻¹]
H_{max}	Maximální intenzita magnetického pole	[A*m ⁻¹]
H_k	Koercitivní intenzita magnetického pole	[A*m ⁻¹]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
F_m	Magnetomotorické napětí	[A]
F	Silové působení magnetického pole	[N]
f	Frekvence	[Hz]
I	Proud	[A]
α	Úhel	[°]
l	Délka vodiče	[m]
N	Počet závitů	[-]
N₁	Počet závitů primárního vinutí	[-]
N₂	Počet závitů sekundárního vinutí	[-]
S	Plocha	[m ²]
μ	Permeabilita	[H*m ⁻¹]
μ_r	Relativní permeabilita	[H*m ⁻¹]
μ₀	Magnetická indukčnost konstanta vakua	[H*m ⁻¹]
C	Kapacita	[F]
R	Odpor	[Ω]
A_u	Zesílení	[-]
l_s	Střední délka	[m]
S_{Fe}	Efektivní průřez jádra	[m ²]
f_h	Horní mezní kmitočet	[Hz]
f_m	Mezní kmitočet	[Hz]
U	Napětí	[V]

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	SEZNÁMENÍ SE S PRINCIPY MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY MAGNETICKÝCH OBVODŮ	2
2.1	SEZNÁMENÍ S MAGNETICKÝMI VELIČINAMI	2
2.1.1	<i>Magnetická indukce</i>	<i>2</i>
2.1.2	<i>Intenzita magnetického pole.....</i>	<i>3</i>
[3]	3
2.1.3	<i>Magnetický tok</i>	<i>3</i>
2.1.4	<i>Magnetomotorické napětí</i>	<i>3</i>
2.1.5	<i>Permeabilita</i>	<i>4</i>
2.2	PROBLÉMY PŘI MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VELIČIN	4
2.3	HYSTERÉZNÍ SMYČKA	5
2.4	METODY MĚŘENÍ	6
2.4.1	<i>Balistickým galvanometrem</i>	<i>6</i>
2.4.2	<i>Elektronickým webermetrem</i>	<i>7</i>
2.4.3	<i>Zobrazení za pomoci PC</i>	<i>7</i>
2.4.4	<i>Měření hysterézní smyčky pomocí osciloskopu</i>	<i>7</i>
3	NÁVRH KONCEPCE ÚLOH PRO VÝUKU MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY FEROMAGNETIKA.....	10
4	NÁVRH PŘÍPRAVKU S RŮZNÝMI MAGNETICKÝMI OBVODY PRO MĚŘENÍ S OSCILOSKOPEM	11
4.1	NÁVRH MĚŘICÍ SOUSTAVY	11
4.2	NÁVRH ZESILOVAČE	12
4.3	NÁVRH INTEGRÁTORU A NAPĚŤOVÉHO SLEDOVAČE	14
4.4	NÁVRH OCHRANY SIGNALIZACE	16
4.5	NÁVRH SCHÉMATU PRO NAPÁJENÍ VENTILÁTORU	16
4.6	NÁVRH VZORKŮ	17
4.6.1	<i>Vzorek 1- návrh vinutí pro jádro z trafoplechů tvaru EE</i>	<i>17</i>
4.6.2	<i>Vzorek 2- návrh vinutí pro železoprachové jádro tvaru EE.....</i>	<i>19</i>
4.6.3	<i>Vzorek 3 návrh vinutí pro toroidní jádro</i>	<i>20</i>
5	REALIZACE NAVRŽENÉHO PŘÍPRAVKU PRO LABORATORNÍ VÝUKU	22
5.1	ZESILOVAČ DSP	22
5.2	INTEGRÁTOR DSP	23
5.3	SIGNALIZACE- OCHRANA DSP	23
5.4	DSP PRO NAPÁJENÍ VENTILÁTORU	24
5.5	NÁVRH KOSTRY	24
5.6	REALIZACE NAVRŽENÝCH TRAF	25
6	OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ REALIZOVANÉHO MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU	27

6.1	TESTOVÁNÍ ZESILOVAČE.....	27
6.2	TESTOVÁNÍ INTEGRÁTORU	29
6.3	TESTOVÁNÍ CELÉHO PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY	30
6.3.1	<i>Měření hysterézní smyčky trafoplechů tvaru EE pomocí osciloskopu</i>	<i>31</i>
6.3.2	<i>Měření hysterézní smyčky železoprachového jádra tvaru EE pomocí osciloskopu</i>	<i>33</i>
6.3.3	<i>Měření hysterézní smyčky toroidního jádra pomocí osciloskopu.....</i>	<i>35</i>
6.3.4	<i>Srovnání všech vzorků</i>	<i>36</i>
7	VYTVOŘENÍ ÚLOH PRO MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY FEROMAGNETIKA POMOCÍ OSCILOSKOPU	38
7.1	CÍL MĚŘENÍ.....	38
7.2	ZADANÍ.....	38
8	ZÁVĚR	39
9	POUŽITÁ LITERATURA	40
10	PÍLOHY	42
10.1	SEZNAM SOUČÁSTEK	42
10.2	PRŮVOD K LABORATORNÍ ÚLOZE.....	44
10.3	VZOROVÝ PROTOKOL.....	50

Seznam obrázků:

Obr. 2.1 Silové účinky magnetického pole	3
Obr. 2.2 Hysterézní smyčka dvou rozdílných materiálů	5
Obr. 2.3 Zapojení obvodu pro měření křivky prvotní magnetizace balistickým galvanometrem...	6
Obr. 2.4 Zapojení obvodu pro měření křivky prvotní magnetizace fluxmetrem	7
Obr. 2.5 Základní uspořádání měřicího pracoviště pro snímání hysterézní smyčky pomocí osciloskopu	7
Obr. 2.6 Měření dynamické hysterézní smyčky- a)Zapojení s pasivním integrátorem a s pomocným vinutím. b) Frekvenční charakteristika a chyba pasivního integrátoru.....	9
Obr. 4.1 Blokové schéma návrhu přípravku	11
Obr. 4.2 Zesilovač TDA2050.....	12
Obr. 4.3 Schéma integrátoru a napěťového sledovače.....	14
Obr. 4.4 Přejíhlová charakteristika invertujícího integrátoru	15
Obr. 4.5 Schéma signalizace a ochrany	16
4.6 Schéma napájení ventilátoru	16
Obr. 4.7 Trafoplechy ve tvaru EE s geometrickými rozměry	17
Obr. 4.8 Železoprachové jádro ve tvaru EE s geometrickými rozměry	19
Obr. 4.9 Rozměry toroidního jádra	20
Obr. 5.1 DSP zesilovač TDA 2050 a osazovací plán DSP.....	22
Obr. 5.2 DSP integrátor a napěťový sledovač a osazovací plán	23
Obr. 5.3 DSP signalizace ochrana a osazovací plán	23
Obr. 5.4 DSP pro napájení ventilátoru a osazovací plán.....	24
Obr. 5.5 Základová deska přípravku	24
Obr. 5.6 Přední krycí plexisklo	25
Obr. 5.7 Realizovaný vzorek 1 z tafoplechů tvaru EE.....	25
Obr. 5.8 Realizovaný vzorek 2 z železoprachového jádra tvaru EE	26
Obr. 5.9 Realizovaný vzorek 3 z feritovým toroidním jádrem	26
Obr. 6.1 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 100 mV a 50 Hz.....	27
Obr. 6.2 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 400 mV a 50 Hz.....	27
Obr. 6.3 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 100 mV a 100 kHz	28
Obr. 6.4 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 400 mV a 100 kHz	28
Obr. 6.5 Zelený vstupní signál do integrátoru a žlutý výstupní signál z integrátoru při 50 Hz a 10 V.....	29
Obr. 6.6 Zelený signál je vstupní o amplitudě 5 V a 100 kHz, žlutý signál je výstupní signál z integrátoru	29
Obr. 6.7 Hotový přípravek	30
Obr. 6.8 Hysterézní smyčka trafoplechů tvaru EE při 200 Hz.....	31
Obr. 6.9 Hysterézní smyčka železoprachového jádra při 3kHz	33
Obr. 6.10 Hysterézní smyčka toroidního jádra při 1 kHz	35

Seznam tabulek:

Tab. 4.1 platí pro plechy EI, $B = 1\text{ T}$ a $J = 2,5\text{ A/mm}^2$	18
Tab. 6.1 Výsledky naměřených parametrů jednotlivých jader.....	36

1 ÚVOD

Hlavní cíl této práce je vytvořit přípravek, který bude sloužit jako nástroj pro měření různých magnetických obvodů a pro zobrazení jednotlivých hysterézních smyček.

Dalším dílčím úkolem je tvorba laboratorní úlohy. Důvodem tvorby této úlohy je vytvoření nového typu měření, sloužící pro studijní účely na VŠB.

V teoretickém úvodu této bakalářské práce jsou popsány základní fyzikální veličiny, které jsou spojeny s měřením dynamické hysterézní smyčky. Hysterézní smyčka vyjadřuje závislost magnetické indukce B v jednotkách tesla [T] na intenzitě magnetického pole H v $[A \cdot m^{-1}]$. Magnetická indukce je vektorová veličina, vyjadřující počet indukčních siločar magnetického pole, které procházejí jednotkovou plochou, kolmo na směr siločar. Jednotkou je tesla. Intenzita magnetického pole je také vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí. Jednotkou je ampér na metr. Matematicky popsáno vztahem $B = f(H)$.

V další části práce jsou popsány způsoby, jakými je možné měřit hysterézní smyčky. Dle zadání byl pro zobrazení hysterézní smyčky použit osciloskop. Velkou výhodou osciloskopu je především názornost grafického zobrazení. Spojitá křivka závislosti intenzity magnetického pole na magnetické indukci mnohdy vypoví o zkoumaném jevu více, než sebed přesnější, byť mnohonásobný, číselný údaj. Navíc díky kurzorům je odečítání hodnot na displeji osciloskopu velmi přesné.

V práci je dále popsán vlastní návrh měřicího přípravku, pomocí kterého se bude realizovat měření, včetně zapojení příslušných přístrojů. Realizovaný přípravek se skládá z několika bloků. Níže budou tyto jednotlivé bloky uvedeny, jejich konkrétní návrhy i s výpočty a popisy.

V závěru této bakalářské práce dále uvedu postup sestavení a výroby měřicího přípravku, přičemž poslední část práce bude věnována provedenímu měření.

2 SEZNÁMENÍ SE S PRINCIPY MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY MAGNETICKÝCH OBVODŮ

2.1 Seznámení s magnetickými veličinami

Magnetické pole je charakterizováno dvěma dvojicemi základních veličin a to místních a celkových.

Místní veličiny charakterizují magnetické pole v každém místě a jsou to magnetická indukce B [T] a intenzita magnetického pole H [A. m⁻¹]. Veličiny celkové jsou magnetomotorické napětí F_m [A] a magnetický tok Φ [Wb].

[3]

2.1.1 Magnetická indukce

Značíme ji B . Je to vektorová fyzikální veličina vyjadřující počet indukčních siločar magnetického pole procházející plochou, kolmo na směr siločar – tj. hustotu indukčních siločar daného magnetického pole.

Na základě silového působení magnetického pole F [N] na vodič, kterým prochází elektrický proud I [A], dále závisí na velikosti úhlu α [°] mezi vodičem a indukčními čarami a na délce vodiče l [m] v magnetickém poli (aktivní délky vodiče). Jednotka magnetické indukce je tesla [T]. Je to vektor.

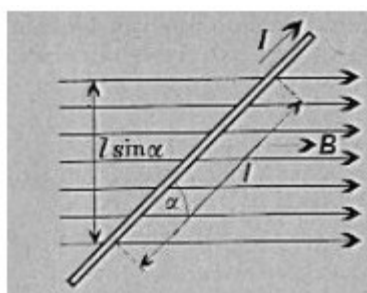
$$B = \frac{F}{I \times l \times \sin \alpha} \quad \text{popřípadě} \quad B = \frac{F}{I \times l} \quad (1)$$

$$B = \mu \times H \quad (2)$$

Svírá-li vodič se směrem indukčních čar magnetické indukce úhel α a je-li délka té části vodiče, která je v magnetickém poli, bude $l \sin \alpha$ její kolmý průmět do směru kolmého k směru pole obr. 2.1. Síla, kterou bude působit magnetické pole na vodič, bude:

$$F = B \times I \times l \times \sin \alpha \quad (3)$$

Směr a smysl síly F se určuje podle pravidla pravé ruky. [3] [2]



Obr. 2.1 Silové účinky magnetického pole

2.1.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$] je definována jako podíl magnetomotorického napětí F_m k jednotce délky indukční čáry l [m] pro homogenní pole při N závitech. Pro intenzitu magnetického pole není zavedena zvláštní jednotka, udává se v [$A \cdot m^{-1}$]. Je to vektorová veličina vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole, která vytvářejí (např. velikost elektrického proudu, tekoucího vodičem cívky) a to nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

$$H = \frac{F_m}{l} = \frac{I \times N}{l} \quad (4)$$

[3]

2.1.3 Magnetický tok

$$\Phi = B \times S \quad (5)$$

Magnetický tok se značí Φ . Určuje pole celkově v ploše S [m^2], má charakter toku. Je to skalární veličina. Jednotkou magnetického toku je weber [Wb]. Magnetomotorické napětí je příčinou vzniku magnetického toku Φ . [3]

2.1.4 Magnetomotorické napětí

Magnetomotorické napětí osamělého vodiče, kterým prochází proud I , je:

$$F_m = I \quad (6)$$

Obklopuje-li zvolená indukční čára plochu, ve které jsou vodiče, jimiž prochází proud nestejným směrem, je výsledné magnetomotorické napětí dáno algebraickým součtem magnetických napětí vyvolaných jednotlivými vodiči.

$$F_m = I \quad (7)$$

$$F_m = \sum_{k=1}^n \times U_{mk} \quad (8)$$

Magnetomotorické napětí cívky o N závitů je definováno vztahem.

$$F_m = N \times I \quad (9)$$

Jednotkou magnetomotorického napětí je ampér [A]. Vztah mezi místními veličinami:

$$B = \mu \times H \quad (10)$$

[3][2]

2.1.5 Permeabilita

Značíme ji μ . Je to skalární fyzikální veličina vyjadřující magnetickou polarizovatelnou (magnetickou „vodivost“, propustnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvořeno. Pro vakuum a přibližně pro vzduch platí.

$$\mu = \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ H} \times \text{m}^{-1} \quad (11)$$

$$\mu = \mu_o \times \mu_r = \frac{B}{H}$$

Pro jiná prostředí je $\mu = \mu_o \times \mu_r$, kde μ_o je poměrná permeabilita prostředí a μ_r relativní permeabilita. U magnetických vodivých látek je relativní permeabilita větší, než permeabilita vakua (vzduchu). U feromagnetických látek je $\mu_r > 1000$ krát μ_o .

[2] [3]

2.2 Problémy při měření magnetických veličin

Povaha magnetických jevů i měřených vlastností zkoumaných materiálů přináší řadu problémů, které je nutno znát a brát v úvahu při hodnocení magnetických měření.

Ke stanovení intenzity magnetického pole a jeho indukce je nutné určit délku siločar a náležitou plochu. Ve skutečnosti zjištění těchto geometrických veličin je často obtížné, protože délky siločar a plocha, jimiž pronikají magnetické toky, nemusí být totožné s geometrickými rozměry cívek, obvodů či vzorků.

Magnetická vodivost feromagnetických materiálů je vzhledem k okolnímu prostředí (vzduch) jen asi o 2 až 4 řády větší, takže se magnetické toky uzavírají i mimo magnetické obvody (rozptyl), což nepříznivě ovlivňuje přesnost měření.

Tvar magnetického obvodu nebo vzorku, resp. přítomnost feromagnetického materiálu v blízkosti měřeného pole ve vzduchu, má značný vliv na výsledky magnetického měření.

Nehomogenita magnetizace a anizotropie (tj. nestejné fyzikálně-mechanické vlastnosti v různých souřadnicových směrech) zkoumaného materiálu mohou být příčinou malé reprodukovatelnosti měření.

Magnetická remanence vzniklá předchozí magnetizací zanáší do měření chyby. Před každým měřením je třeba důkladně vzorky odmagnetovat.

Střídavé magnetování feromagnetických obvodů způsobuje zkreslení proudu (průběh se začne odchylvat od sinusovky).

Střídavé magnetování způsobuje vždy ohřev vzorku a to vlivem *hysterézních ztrát*, které jsou úměrné ploše hysterézní smyčky a velikosti kmitočtu. Dále vlivem *vířivých proudů* – indukovaných ve vzorku, ty jsou úměrné ohmickému odporu materiálu a druhé mocnině kmitočtu.

Změna teploty vzorku ovlivňuje magnetické vlastnosti – hodnota permeability s rostoucí teplotou klesá.

U některých magneticky měkkých materiálů (např. permalloy) může mechanické namáhání ovlivnit magnetické vlastnosti.

Výsledky magnetických měření (zvláště ve vzduchu) mohou být ovlivněny vnějšími rozptylovými magnetickými poli.

[2][3][7]

2.3 Hysterézní smyčka

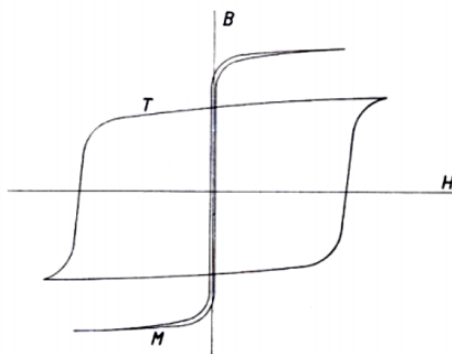
Je to závislost magnetické indukce B [T] na intenzitě magnetického pole H [A. m⁻¹]. Jinak řečeno hysterézní smyčka vyjadřuje grafickou reprezentaci fyzikálního jevu. Matematicky je popsána rovnicí:

$$B = \mu_r \times H \quad (12)$$

kde μ_r je relativní permeabilita daného materiálu. Podle permeability rozdělujeme materiály na:

1. Diamagnetické ($\mu_r < 1$)
2. Paramagnetické ($\mu_r > 1$)
3. Feromagnetické ($\mu_r \gg 1$)

U feromagnetických materiálů neplatí lineární závislost mezi B a H (magnetickou indukci a intenzitou magnetického pole). Podle druhu materiálu se také odlišují tvary hysterézní smyčky pro ilustraci Obr. 2.2



Obr. 2.2 Hysterézní smyčka dvou rozdílných materiálů

Z Obr. 2.2 je vidět, že smyčka T vyjadřuje děj magneticky tvrdého materiálu– naznačuje to široká hysterézní smyčka, kde je velká koercitivita H_k a má malou relativní permeabilitu. Tyto materiály se používají pro výrobu permanentních magnetů. Tyto vlastnosti mají slitiny typu AlNi nebo AlNiCo nebo tvrdé ferity.

Hysterézní smyčka M vyjadřuje děj magneticky měkkého materiálu– toto se pozná podle úzké hysterézní smyčky a malé plochy smyčky s malou koercitivitou H_k a velkou relativní permeabilitou. Tyto materiály se používají pro výrobu relé, transformátorů atd. Tyto vlastnosti má měkká ocel, křemiková ocel, šedá litina, permalloy, měkký ferit.

Hlavní rozdíl mezi tvrdým a měkkým materiálem je v tom, že když se vyjme tvrdý materiál z magnetického pole, daný materiál zůstává zmagnetovaný (tzv. permanentní magnet). Když se vyjme z magnetického pole materiál magneticky měkký, ztratí své vlastnosti okamžitě. Tento jev má souvislost se strukturou krystalické mřížky obou materiálů.

[1][2][3][8]

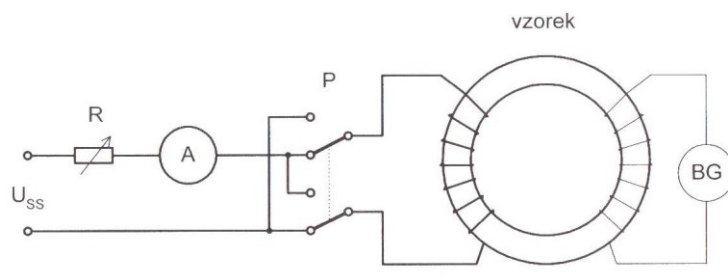
2.4 Metody měření

2.4.1 Balistickým galvanometrem

Jedna z metod, kterými lze měřit hysterézní smyčku, je metoda využívající balistický galvanometr. Měřený vzorek má tvar např. toroidu a na něm je navinuta magnetizační cívka. Do cívky se zavádí proud, který budí potřebné magnetické pole H . Na vzorku je dále umístěna menší měrná cívka, která je zapojena do obvodu balistického galvanometru a pomocí níž se měří magnetická indukce B ve zkoumaném vzorku. Přístroj měří prošlý náboj při krátkodobých proudových impulsích.

Při měření křivky prvotní magnetizace měříme velikost magnetické indukce pro jednotlivé hodnoty intenzity magnetického pole. Velikost proudu v obvodu magnetizační cívky se vypočte ze vztahu pro magnetometrické napětí.

Výchylku balistického galvanometru způsobí nekomutováním proudu ve vinutí magnetizační cívky pomocí komutačního přepínače P . Tak lze změnit hodnotu magnetického toku z $+\Phi$ na $-\Phi$, změna toku je tedy $\Delta\Phi = 2\Phi$. Tato změna magnetického toku indukuje v měřicí cívce impuls napětí, který podle ohmova zákona protlačí balistickým galvanometrem proudový impuls.



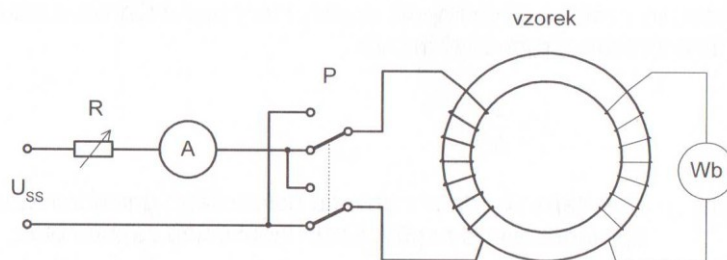
Obr. 2.3 Zapojení obvodu pro měření křivky prvotní magnetizace balistickým galvanometrem

[1] [2]

2.4.2 Elektronickým webermetrem

Elektronický webermetr (nazývaný též fluxmetr) je laboratorní přístroj sloužící k měření magnetického indukčního toku. Elektronický Wb-metr je v principu tvořen přesným integračním zesilovačem.

Změníme-li komutačním přepínačem směr proudu v magnetizační cívce, mění se magnetický tok vzorku z $+\Phi$ na $-\Phi$, změna magnetického toku $\Delta\Phi = 2\Phi$ způsobí naindukování napěťového impulsu do pomocné cívky, který změni výchylku fluxmetru.



Obr. 2.4 Zapojení obvodu pro měření křivky prvotní magnetizace fluxmetrem

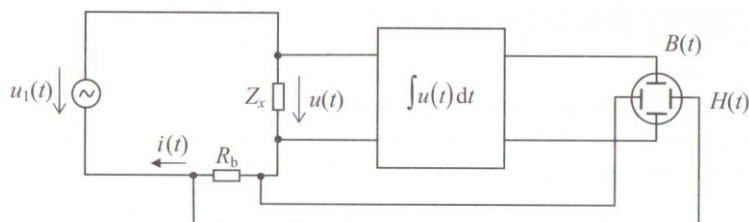
[1] [2]

2.4.3 Zobrazení za pomoci PC

Zobrazení se provádí pomocí PC. Pro snímání dvou různých signálů je potřeba mít měřicí kartu, která má dva analogové vstupy a jeden výstup. K této kartě je potřeba software, aby se získaná data mohla dále zpracovat. Dále je potřeba využití výkonové části pro buzení jádra. Další částí je integrátor, ten může být realizován buď pomocí hardwaru nebo softwaru. Velkou výhodou je okamžité zobrazení výsledků a další zpracování, které je snazší.

2.4.4 Měření hysterézní smyčky pomocí osciloskopu

Na Obr. 2.5 je ukázáno základní uspořádání měřícího řetězce pro snímání hysterézní smyčky pomocí osciloskopu. Měřená cívka o neznámé impedanci Z_x je napájena harmonickým napětím ze zdroje napětí.



Obr. 2.5 Základní uspořádání měřícího pracoviště pro snímání hysterézní smyčky pomocí osciloskopu

Základní měřicí pracoviště podle Obr. 2.5 je upraveno za prvé tak, že napětí je snímáno nikoli přímo, ale z pomocného vinutí N_2 , které má těsnou vazbu na N_1 . Tímto je potlačen parazitní úbytek u_r na rezistoru R_{Cu} na pracovním vinutí.

Druhá úprava spočívá v tom, že je přesný, nejlépe aktivní, integrátor realizovaný operačním zesilovačem. Může být ale také nahrazen pasivním integračním členem RC, avšak pouze při splnění určité nerovnosti. Aby chyba pasivního integrátoru byla co nejmenší, musí jeho horní mezní kmitočet f_h splňovat nerovnost.

$$f_h = \frac{1}{2\pi \times R \times C} \ll f_m \quad (13)$$

Při dodržení této nerovnosti je toto doprovázeno nechtěnou nerovností mezi napětím $u(t)$ a $u_c(t)$ na vstupu a výstupu RC členu.

$$u_c(t) \ll u(t) \quad (14)$$

Čím má být integrace přesnější, tím menší je výstupní napětí. Toto je hlavní nevýhoda při použití pasivního integrátoru. Při dodržení těchto pravidel můžeme výstup RC členu vyjádřit takto:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{u(t) - u_c(t)}{R} dt \cong \frac{1}{C} \int \frac{u(t)}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u(t) dt \quad (15)$$

Pro aktivní integrátor s operačním zesilovačem by výše uvedená rovnice platila absolutně přesně. Z rovnice tedy plyne:

$$\int u(t) dt = R \times C \times u_c(t) \quad (16)$$

Pak lze vyjádřit tok měřené cívky takto:

$$\Psi(t) = N_2 \times \Phi(t) = N_1 \times B(t) \times S_{Fe} = \int u_l(t) dt = \frac{N_1}{N_2} \int u_l(t) dt = \frac{N_1}{N_2} \times R \times C \times u_c(t) \quad (17)$$

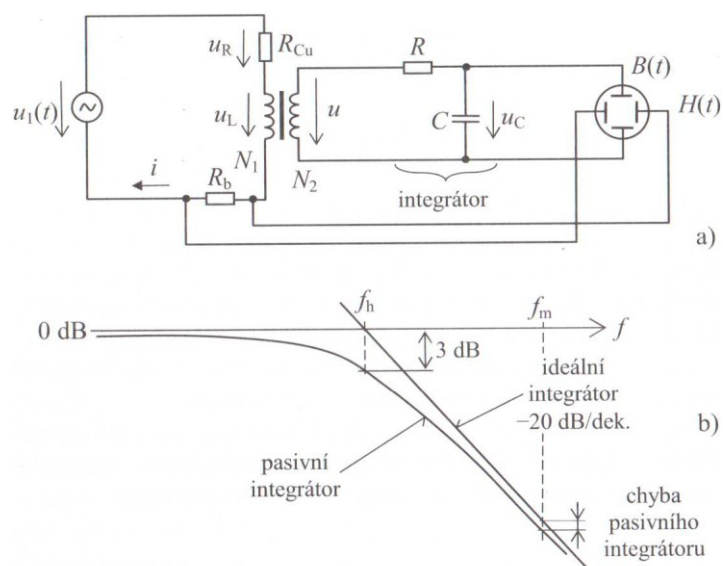
Odtud plyne vztah pro magnetickou indukci:

$$B(t) = \frac{R \times C}{N_2 \times S_{Fe}} \times u_c(t) \quad (18)$$

Převodní vztah pro intenzitu magnetického pole má tvar:

$$H(t) = \frac{N_1}{l_{Fe}} \times i(t) = \frac{N_1}{R_b \times l_{Fe}} \times u_b(t) \quad (19)$$

Kde $u_b(t)$ je napětí snímané z bočníku R_b .



Obr. 2.6 Měření dynamické hysterézní smyčky- a)Zapojení s pasivním integrátorem a s pomocným vinutím. b) Frekvenční charakteristika a chyba pasivního integrátoru

Osciloskop musí být nastaven pro práci v režimu X-Y. Protože osciloskop je citlivý na napětí a ne na proud, nemůžeme jím měřit magnetizační proud přímo, ale prostřednictvím snímacího rezistoru jej převedeme na napětí, které přivedeme na vstup X osciloskopu. Tento snímací rezistor R_b je zapojen v primárním obvodu měřeného transformátoru.

[1] [2]

3 NÁVRH KONCEPCE ÚLOH PRO VÝUKU MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY FEROMAGNETIKA

Laboratorní úloha bude navržena tak, aby si studenti mohli změřit hysterézní smyčky předem připravených traf. Získané naměřené smyčky mohou dále porovnat mezi sebou. Na navrženém přípravku si budou studenti nastavovat danou konstantu K_i , která určuje strmost integrace pro dané frekvence. Díky přípravku budou moci snímat intenzitu magnetického pole H , která bude snímána z primárního vinutí pomocí předřadného odporu R_s za použití osciloskopické sondy. Snímané napětí bude úměrné tekoucímu proudu v primárním vinutí. Dále se bude snímat magnetická indukce B . Jelikož na sekundárním vinutí není veličina úměrná magnetické indukci, bude se toto napětí integrovat pomocí integrátoru.

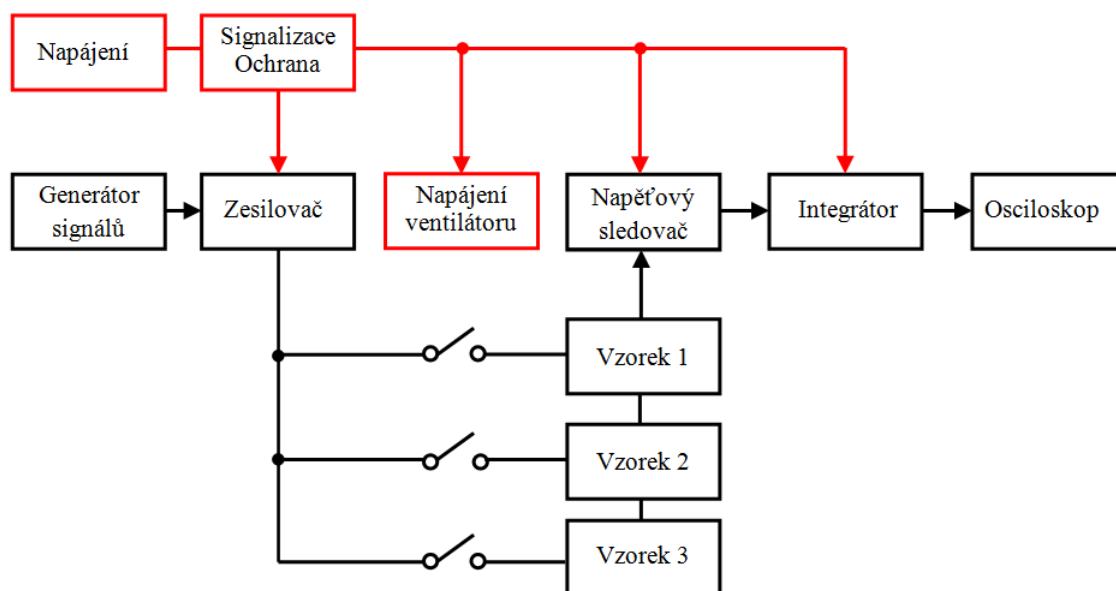
Jednotlivé vzorky se budou zapojovat do nepájivého pole. Primární vinutí bude zapojeno na výstup výkonového operačního zesilovače a sekundární vinutí bude zapojeno na vstup integrátoru. Dále si tyto průběhy lze zobrazit na osciloskopu v režimu XY.

4 NÁVRH PŘÍPRAVKU S RŮZNÝMI MAGNETICKÝMI OBVODY PRO MĚŘENÍ S OSCILOSKOPEM

V této kapitole bude popsán návrh přípravku. Budou zde uvedeny jednotlivé bloky s konkrétními návrhy schémat. V další části budou návrhy traf.

4.1 Návrh měřicí soustavy

Návrh blokového schématu měřicího přípravku. Na základě nastudované technické literatury a dalších studijních materiálů byl navrženo blokové schéma. Blokové schéma bude obsahovat následující bloky, které jsou vyobrazeny na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Blokové schéma návrhu přípravku

Jako generátor signálu byl použit laboratorní generátor, který je schopen generovat sinus s frekvencí od 50 Hz až 100 kHz s amplitudou od 100 mV až 400 mV, což je pro toto měření plně dostačující.

Blok zesilovače slouží k zesílení signálu tak, aby bylo možno vybudit daný vzorek. Jako zesilovač byl použit integrovaný TDA2050, který disponuje dostatečným výkonem při malém zkreslení. Tento integrovaný obvod bude napájen symetricky ± 15 V.

Blok „Vzorek 1“ bude trafo z trafoplechů tvaru EE. Vzorek 2 bude trafo z železoprachovým jádrem tvaru EE. Vzorek 3 bude toroidní trafo. Každé trafo bude mít jinou hysterézní smyčku.

Blok „Napěťový sledovač“ slouží k oddělení sekundárního vinutí a integrátoru a to díky vysokému vstupnímu odporu tohoto napěťového sledovače, jenž má zesílení 1. Napěťový sledovač bude napájen ± 15 V.

Blok „Integrátor“ slouží k integraci napětí na sekundárním vinutí na daném vzorku. Napětí na sekundárním vinutí se musí integrovat, z důvodu dosažení veličiny úměrné magnetické indukci B [T]. Integrátor bude napájen symetricky ± 15 V.

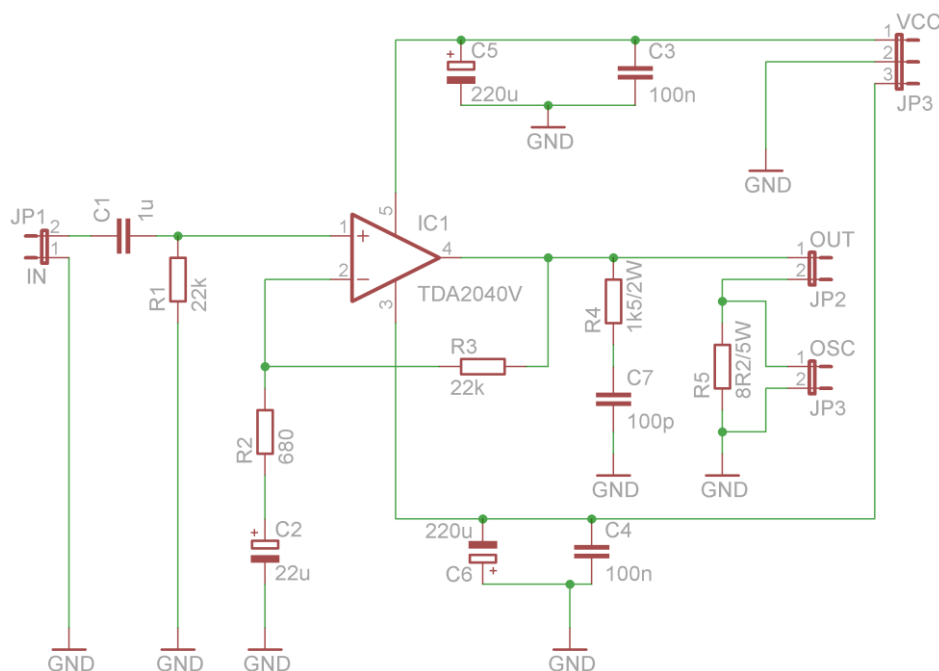
Blok „Napájení“ bude sloužit k symetrickému napájení. Bude zde využíván laboratorní zdroj, který bude napájet všechny ostatní bloky napětím ± 15 V.

Blok „Signalizace- Ochrana“ bude použit k ochraně bloků zesilovače a integrátoru proti přepólování. Signalizace bude signalizovat stav, kdy jsou nebo nejsou napájeny všechny bloky.

Blok „Napájení ventilátoru“ bude upravovat napětí pro ventilátor. Ventilátor bude napájen 12 V a bude využit k lepšímu chlazení výkonového zesilovače.

Pro blok „Osciloskop“ bude používán laboratorní osciloskop, díky kterému se zobrazí hysterézní smyčky v režimu XY, v závislosti na intenzitě magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$] a magnetické indukci B [T].

4.2 Návrh zesilovače



Obr. 4.2 Zesilovač TDA2050

Pro buzení jádra byl použit integrovaný zesilovač TDA2050. Zesilovač je schopen dodávat až 28 W, při 4 Ω zatížení na výstupu se zkreslením 0,5 %. Při zatížení 8 Ω dodává 18 W se zkreslením 0,5 %. Tento zesilovač pracuje v třídě AB. Obvod TDA2050 má integrovanou ochranu proti zkratu a tepelnou pojistku. TDA2050 je umístěn v pouzdře PENTAWATT, které má 5 vývodů a díru pro přišroubování na chladič. Zesilovač je zapojen jako neinvertující. Na pouzdře je vyveden záporný pól, proto nesmí být chladič vodivě spojen s kustrou. Napájecí napětí bylo zvoleno symetrické, konkrétně ± 15 V. Při tomto napětí zesilovač dodává 15 W při zatížení 8 Ω . Zvolených ± 15 V vyhovuje integrovanému obvodu TL072, který má maximální napájecí napětí ± 18 V. Na vstupu se nachází kapacita C1,

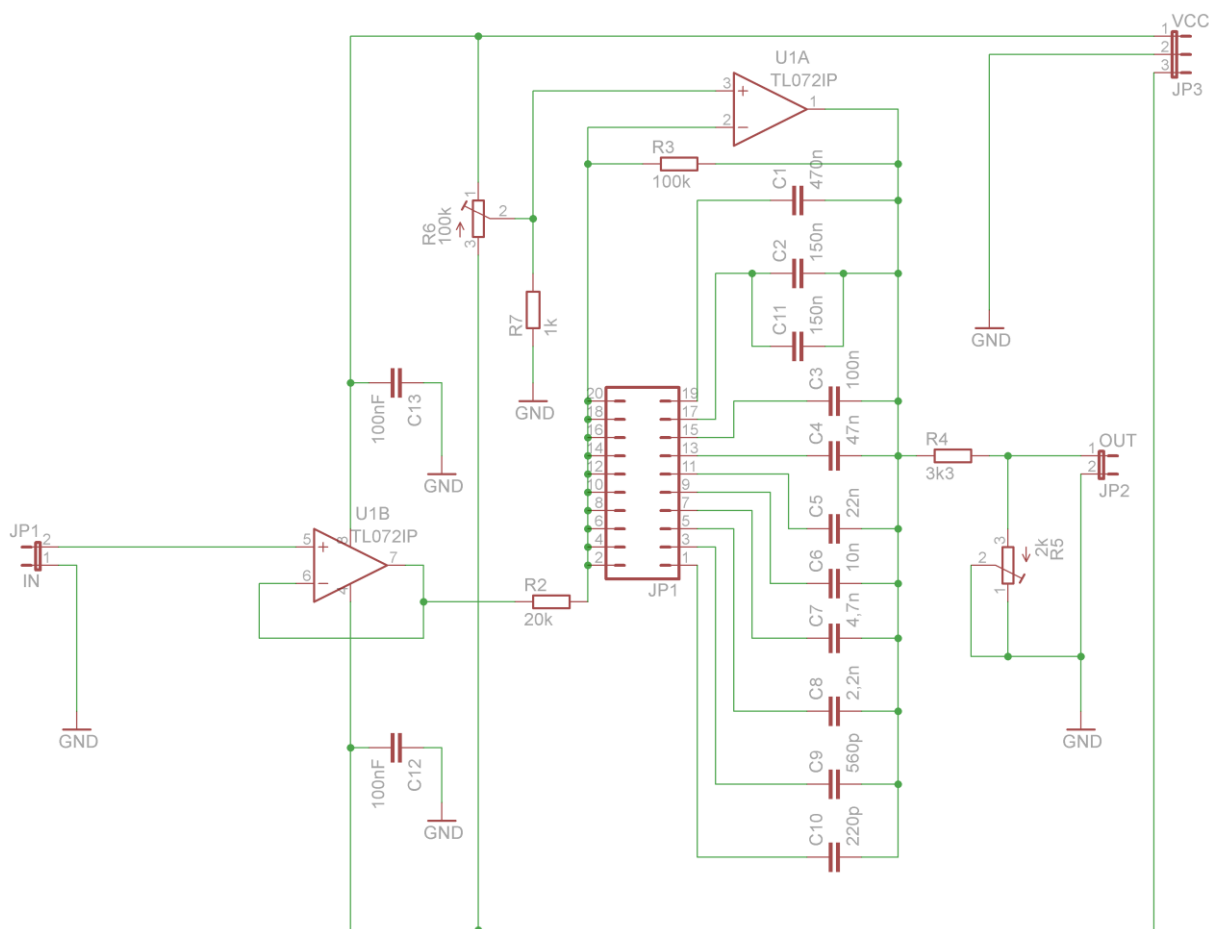
kteřá se stará o to, aby na vstup neprošlo stejnosměrné napětí, které může způsobit zničení integrovaného obvodu. Odpor R1 slouží k zmenšení vstupní citlivosti zesilovače, bez tohoto odporu se může zesilovač díky velké citlivosti stávat nestabilní. Rezistor R2 a R3 udává zesílení operačního zesilovače, ten je nastaven tak, ať je k dispozici zesílení větší než 24 dB. Poměr R2 a R3 byl zvolen tak, ať je zesílení nastaveno na 33 dB. To se vypočte:

$$Au = 1 + \frac{R3}{R2} = 1 + \frac{22000}{680} = 33,35 \text{ dB} \quad (20)$$

Dále je na výstupu boucherotův člen, který je realizován pomocí C7 a R4 a slouží k tomu, aby se zesilovač nerozkmital na vysokých frekvencích. Odpor R5= R_s slouží jako snímací rezistor pro primární vinutí. Tento odpor bude převádět proud tekoucí primárním vinutím na napětí, toto napětí lze snímat pomocí osciloskopu. Kondenzátory C3 a C4 jsou zapojeny co nejbliže integrovanému obvodu a zabráňují nežádoucímu kmitání na frekvencích asi 500 kHz až 3 MHz. C5 a C6 jsou kondenzátory elektrolitické na dodatečné vyhlazení napájecího napětí. R2 a C2 slouží k omezení šířky pásma zesilovače, které bude posléze zesíleno. Samotný kondenzátor C2 blokuje stejnosměrné napětí na invertující vstup.

Pro chlazení integrovaného obvodu byl použit chladič z procesoru o rozměru 50 x 50 x 25 mm. Jelikož bude chladič upevněn na nevodivé konstrukci, není třeba dávat mezi kontakt s chladičem izolační podložku. Pro zlepšení přenosu tepla mezi integrovaným obvodem a chladičem byla použita teplovodivá pasta, která navíc dokonale vyplní povrchové nerovnosti mezi zdrojem tepla a chladičem.

4.3 Návrh integrátoru a napět'ového sledovače



Obr. 4.3 Schéma integrátoru a napět'ového sledovače

Integrátor a napět'ový sledovač bude realizován pomocí obvodu TL072, který obsahuje dva zesilovače. Integrovaný obvod je v pouzdrě 8 PINS - PLASTIC DIP. Napájecí napětí bude symetrické ± 15 V. Má integrovanou ochranu proti zkratu. Nízké harmonické zkreslení 0,01 %. Maximální výkon 680 mW při max. ± 18 V napjecím napětí. Velká šířka pásma 4 MHz je pro tyto účely dostačující.

Zesilovač B je zapojen, jako napět'ový sledovač a slouží k úpravě signálů. Napětí na vstupu sleduje napětí na výstupu, odtud název napět'ový sledovač. Zapojení má vysoký vstupní odpor a malý výstupní odpor. Napět'ový sledovač bude oddělovat funkci sekundárního vinutí a integrátoru.

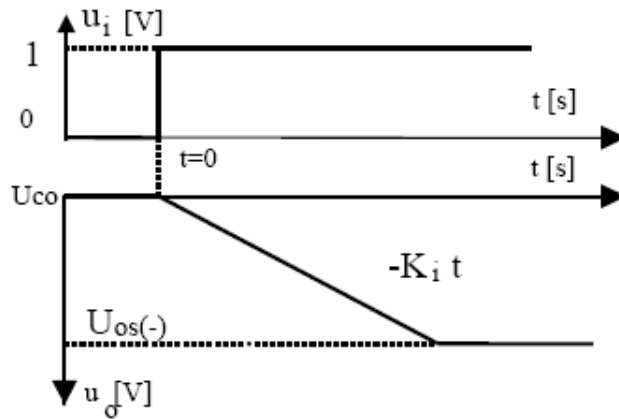
Zesilovač A je zapojen jako Millerův integrátor. Jedná se o invertující zesilovač, v jehož zpětné vazbě jsou impedance Z_R (R2) a Z_C (C1 až C11). Přenos integrátoru je dán:

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_c}{Z_R} = -\frac{1}{s \times R \times C} = -K_i \times \frac{1}{s} \quad (21)$$

Současně bude na výstupu v časové oblasti napětí:

$$u_o(t) = -\frac{1}{R \times C} \int u_i(t) dt + U_{co} \quad (22)$$

Napětí U_{co} je počáteční napětí na kondenzátoru. $K_i = 1/RC$. Pro posuzování reálného a ideálního integrátoru používáme přechodové charakteristiky.



Obr. 4.4 Přechodová charakteristika invertujícího integrátoru

Rezistor R2 slouží k omezení tekoucího proudu a zároveň s C1 až C11 určuje integrační konstantu pro daná frekvenční pásma. Odpor R3 se stará o stejnosměrné poměry, nezesílí napěťovou nesymetrii vícekrát než je poměr odporu R2 a R3. Na výstupu je odporový dělič z R4 a R5. R5 je trimr, kterým se nastaví výstupní napětí. Kapacity C11 a C12 slouží k odrušení a zabráňují nežádoucímu kmitání na frekvencích 500 kHz až 3 MHz.

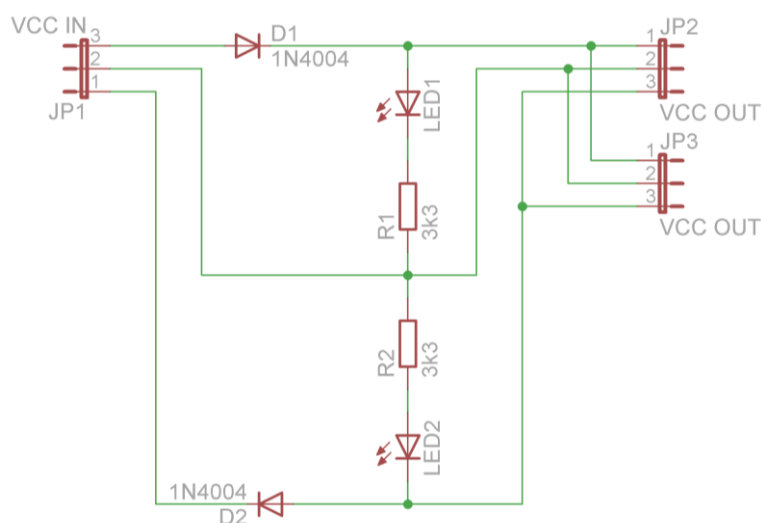
Při návrhu integrátoru s operačním zesilovačem tedy musí být brán zřetel na to, aby časová konstanta tvořená zpětnovazebním kondenzátorem byla podstatně větší, než časová konstanta odpovídající meznímu kmitočtu zesilovače. Aby se integrace blížila ideálnímu integrátoru, musí být poměr mezi R2 a C1 nastaven na nižší frekvenci, než je potřeba integrovat. Předpokládá-li se, že pro tranzitní kmitočet platí přibližně:

$$f_{nastavená} = \frac{1}{2\pi \times R2 \times C1} \ll f_{tranzitní} \quad (23)$$

$$f_{nastav} = \frac{1}{2\pi \times R2 \times C1} = \frac{1}{2\pi \times 20000 \times 470 \times 10^{-9}} = 16,932Hz \ll f_{tranzitní} = 50Hz \quad (24)$$

Zvolí-li se ale moc velká kapacita pro 50 Hz tak na výstupu integrátoru bude moc malé napětí. Při volbě dalších kapacit se postupovalo stejně. Dále odpory R7 a R6 slouží k upravení napěťové nesymetrie a trimrem R6 lze tuto nesymetrii při měření přesně vykompenzovat.

4.4 Návrh ochrany signalizace



Obr. 4.5 Schéma signalizace a ochrany

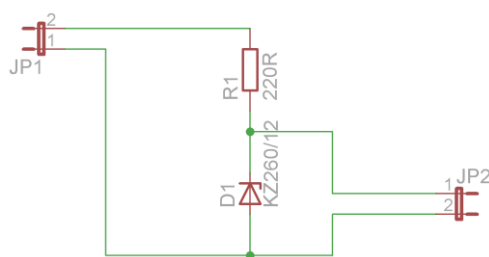
Ochrana je realizovaná pomocí diod D1 a D2, které slouží k tomu, aby nemohlo být přepólováno napájecí napětí ± 15 V pro integrovaný zesilovač TDA2050 a integrovaný obvod TL072.

Signalizace byla realizována pomocí LED1 a LED2 a rezistoru R1 a R2, které slouží k omezení proudu, jenž může protékat diodou. Pokud budou svítit LED1 a LED2, tak je napájení v pořádku a všechny integrované obvody jsou napájeny. Maximální proud LED je 0,005 A.

$$R_{1,2} = \frac{U}{I} = \frac{15}{0,005} = 3000\Omega = 3k\Omega \quad (25)$$

Vypočtená velikost R1 a R2 je 3 kΩ, proto byl vybrán rezistor nejbližší v řadě, tedy o hodnotě 3,3 kΩ.

4.5 Návrh schématu pro napájení ventilátoru



4.6 Schéma napájení ventilátoru

Ventilátor o rozměru 40x40x10 mm typ KD1204PFB1-8 na 12 V a s příkonem 0,7 W bude zapojen na výstup JP2. Napojení musí být upraveno z ± 15 V na 12 V. Dioda D1 je Zenerova dioda na 12 V, která se stará o to, aby na výstupu JP2 bylo napětí 12 V. Rezistorem R1 byl omezen proud tekoucí

diodou. Rezistor R1 s maximálním ztrátovým výkonem 1 W je zde zvolen proto, aby byl schopen chladiť ztrátový výkon. Zenerova dioda D1 má $I_{\max} = 85 \text{ mA}$ při 12 V. Napájecí napětí je $U = 15 \text{ V}$.

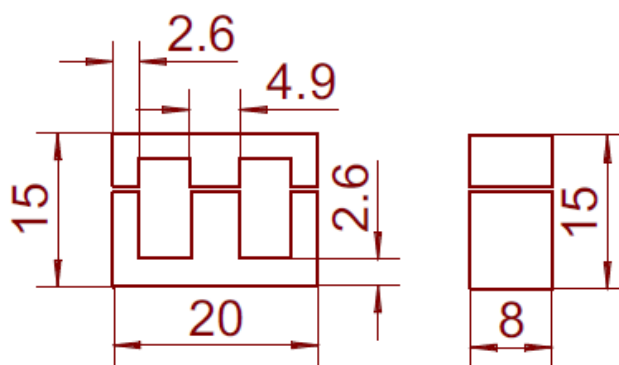
$$R1 = \frac{U}{I_{\max}} = \frac{15}{0,085} = 176,471 \Omega \quad (26)$$

Odpor R1 vyšel 176Ω , proto zvolíme nejbližší hodnotu a to 220Ω v pouzdře 0309.

4.6 Návrh vzorků

Všechny vzorky traf byly získány z nefunkčních elektrických zařízení. Velký problém byl tudíž ten, že k žádnému ze vzorků nebyly k dispozici katalogové údaje. Proto při určování typu traťa, dále určení na jaké frekvenci se toto traťo normálně používá a také zjištění výkonu, jenž je daný vzorek schopen přenést, bylo vycházeno z nastudované literatury. Maximální výkon zesilovače byl limitem. Všechny vzorky budou zapojovány na nepáživém poli.

4.6.1 Vzorek 1- návrh vinutí pro jádro z trafoplechů tvaru EE



Obr. 4.7 Trafoplechy ve tvaru EE s geometrickými rozměry

- a= 20mm
- b= 15mm
- c= 8mm
- d= 2,6mm
- e= 4,9mm

Stanovení efektivního průřezu jádra a střední délky siločáry

Dle rozměrů jádra (viz Obr. 4.7) lze vypočíst efektivní průřez jádra a délku střední siločáry. V případě použitého transformátoru (plášťový typ) mají krajní sloupky poloviční průřez oproti střednímu sloupku. Pro výpočet efektivního průřezu lze uvažovat průřez středního sloupku. Jelikož jádro je sestaveno z plechů, mezi kterými je vložena izolace (z důvodu omezení vířivých proudů), je nutné vypočtený geometrický průřez násobit koeficientem plnění $k_p \approx 0,9$.

Stanovení efektivního průřezu jádra:

$$S_{Fe} = k_p \times e \times c = 0,9 \times 4,9 \times 8 = 35,28 \text{ mm}^2 = 0,3528 \text{ cm}^2 \quad (27)$$

Střední délka siločar se vypočte

$$l_s = 2 \times (b - d) + 2 \times e = 2 \times (15 - 2,6) + 2 \times 4,9 = 34,6 \text{ mm} = 3,46 \text{ cm} \quad (28)$$

Předpokládá se maximální sycení $B = 1 \text{ T}$

$$S = \sqrt{\frac{P_{in}}{B}} \rightarrow P_{in} = (\sqrt{B} \times S_{Fe})^2 = (\sqrt{1} \times 0,3528)^2 = 0,1245 \text{ W} \quad (29)$$

Maximální výkon, který je jádro schopno přenést. Z tohoto lze spočítat vstupní proud pro vstupní napětí U_{in} .

Dále je potřeba vědět počet závitů na jeden volt:

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$B = 1 \text{ T}$$

$$\alpha = \frac{10000}{4,44 \times f \times B \times S} = \frac{10000}{4,44 \times 50 \times 1 \times 0,3528} = 127,677 \text{ zavit/1V} \quad (30)$$

Účinnost transformátorů snižují zejména ztráty ve vinutí a ztráty v jádře. Celkovou účinnost transformátoru lze odhadnout z následující tabulky:

Tab. 4.1 platí pro plechy EI, $B = 1 \text{ T}$ a $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$

Výkon [VA]	účinnost [%]	k1	k2
1-2	70	0,89	1,13
2-5	75	0,91	1,11
5-20	80	0,93	1,08
20-75	85	0,95	1,05
75-200	88	0,96	1,04
200-600	90	0,97	1,03
600-1400	92	0,97	1,02
1400+	93	0,98	1,02

Do vzorce se dosadí průřez skutečného použitého jádra, vstupní napětí U_{in} a použije se konstanta z tabulky K_1 pro výkon 1-2 VA. Počty závitů jednotlivých vinutí lze vypočíst podle tabulky, k_1 pro primární vinutí a k_2 pro sekundární vinutí. U_{in} je zvoleno, tak že toto napětí se při měření překročí a hysterézní ztráty se projeví. $U_{in} = 7 \text{ V}$ a $U_{out} = 1,8 \text{ V}$.

$$N_{primar} = \alpha \times U_{in} \times k_1 = 127,677 \times 7 \times 0,89 = 795,4277 \cong 800 \text{zavitů} \quad (31)$$

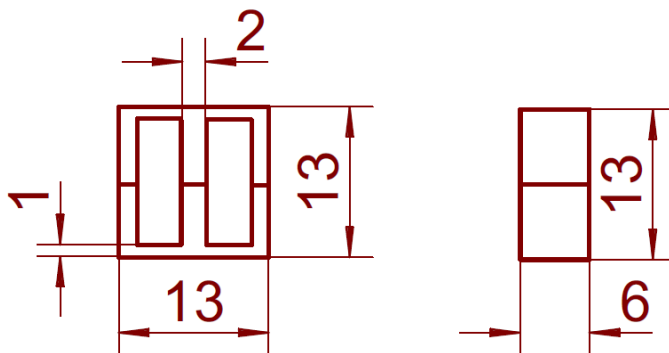
$$N_{sekund} = \alpha \times U_{out} \times k_2 = 127,677 \times 1,9 \times 1,13 = 274,125 \cong 274 \text{zavitů} \quad (32)$$

Průměry vodičů v mm pro jednotlivá vinutí se vypočtou z procházejícího proudu pro proudovou hustotu $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$ (u malých transformátorů se volí až na dvojnásobnou) zde se dimenzuje vinutí na velké přetížení, tak aby bylo limitující pouze jádro vzorku, proto se vinutí dimenzuje na $0,02 \text{ A}$ a proudovou hustotu $J = 5 \text{ A/mm}^2$:

$$d_{in} = \sqrt{\frac{4 \times I}{\pi \times J}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,02}{\pi \times 5}} = 0,07136 \text{ mm} \quad (33)$$

Průřez primárního vinutí d_{in} vyšel $0,071 \text{ mm}$, použije se tedy $0,1 \text{ mm}$. Trafo bude mít poměr vinutí $8:2,7$ lakovaným drátem o průměru $0,1 \text{ mm}$. Primární vinutí bude vyvedeno červeným drátem, začátek vinutí bude označen černým proužkem. Sekundární vinutí bude vyvedeno modrým drátem s černým proužkem označující začátek vinutí.

4.6.2 Vzorek 2- návrh vinutí pro železoprachové jádro tvaru EE



Obr. 4.8 Železoprachové jádro ve tvaru EE s geometrickými rozměry

$a = 13 \text{ mm}$

$b = 13 \text{ mm}$

$c = 6 \text{ mm}$

$d = 1 \text{ mm}$

$e = 2 \text{ mm}$

Stanovení efektivního průřezu jádra a střední délky siločáry

Dle rozměrů jádra (viz Obr. 4.8) se vypočte efektivní průřez jádra a délka střední siločáry. Pro výpočet efektivního průřezu lze uvažovat průřez středního sloupku. Jelikož jádro je lisováno z míchané směsi s pryskyřicí nemusíme při výpočtu S_{Fe} geometrický průřez násobit koeficientem plnění $k_p \approx 0,9$.

Stanovení efektivního průřezu jádra:

$$S_{Fe} = e \times c = 2 \times 6 = 12 \text{ mm}^2 = 0,12 \text{ cm}^2 \quad (34)$$

Střední délka siločar se vypočte:

$$l_s = 2 \times (b - d) + 2 \times e = 2 \times (13 - 1) + 2 \times 2 = 28 \text{ mm} = 2,8 \text{ cm} \quad (35)$$

Předpokládá se maximální sycení $B = 0,5 \text{ T}$. Nejnižší pracovní frekvence se odhadne na $f = 1 \text{ kHz}$. Napětí na primárním vinutí je $U_{in} = 5 \text{ V}$.

$$N_{primar} = \frac{U_{in}}{2\pi \times f \times B \times S_{Fe}} = \frac{5}{2\pi \times 1000 \times 0,5 \times 0,12 \times 10^{-4}} = 132,629 \text{ zavitů} \quad (36)$$

Je odvozen počet závitů na primárním vinutí. Navine se tedy 133 závitů jako primární vinutí. Výstupní napětí na vzorku 2 bude $U_{out} = 5 \text{ V}$.

$$N_{primar} = \frac{U_{in}}{2\pi \times f \times B \times S_{Fe}} = \frac{5}{2\pi \times 1000 \times 0,5 \times 0,12 \times 10^{-4}} = 132,629 \text{ zavitů} \quad (37)$$

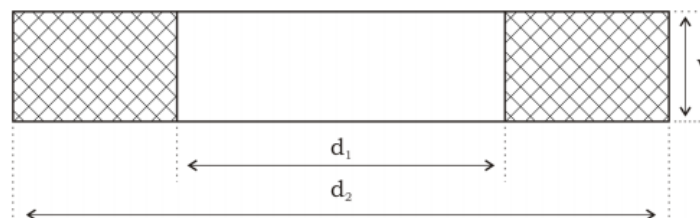
Na sekundárním vinutí bude navinuto 133 závitů.

Dále se vypočte průřez vodiče, kterým se realizuje vinutí. Pro výpočet průřezu vinutí se použije proudová hustota $J = 5 \text{ A/mm}^2$, protože je vinutí hůře chlazeno. Vinutí se bude dimenzovat na $0,1 \text{ A}$.

$$d = \sqrt{\frac{4 \times I}{\pi \times J}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,1}{\pi \times 5}} = 0,1596 \text{ mm} \cong 0,16 \text{ mm} \quad (38)$$

Výsledný průřez vinutí bude realizován lakovaným drátem o průměru $0,2 \text{ mm}$. Trafo bude navinuto v poměru 1:1. Předpokládá se, že tento vzorek byl používán ve spínaném zdroji, tudíž bude konstruován na pracovní frekvenci v řádech kHz. Zelené vývody vinutí označují primární vinutí a modré vývody označují sekundární vinutí. Začátky vinutí jsou označeny černou páskou.

4.6.3 Vzorek 3 návrh vinutí pro toroidní jádro



Obr. 4.9 Rozměry toroidního jádra

$$d_1 = 14,4 \text{ mm}$$

$$d_2 = 27,2 \text{ mm}$$

$v = 11,2 \text{ mm}$

Výpočet efektivního průřezu jádra toroidu:

$$S_{Fe} = \frac{d_2 - d_1}{2} \times v = \frac{27,2 - 14,4}{2} \times 11,2 = 71,68 \text{ mm}^2 = 0,7168 \text{ cm}^2 \quad (39)$$

Střední délka siločar pro toroid:

$$l_s = (d_2 - d_1) \times 2\pi = (27,2 - 14,4) \times 2\pi = 80,4228 \text{ mm} = 8,04248 \text{ cm} \quad (40)$$

Předpokládá se maximální sycení $B = 0,4 \text{ T}$. Odhadla se nejnižší pracovní frekvence na $f = 1 \text{ kHz}$. Napětí na primárním vinutí $U_{in} = 10 \text{ V}$.

$$N_{primar} = \frac{U_{in}}{2\pi \times f \times B \times S} = \frac{10}{2\pi \times 1000 \times 0,4 \times 0,7168 \times 10^{-4}} = 55,508 \text{ závitů} \quad (41)$$

Je odvozen počet závitů na primárním vinutí. Bude tedy navinuto 56 závitů primárního vinutí.

Výstupní napětí na toroidním vzorku by mělo mít hodnotu $U_{out} = 5 \text{ V}$.

$$\begin{aligned} N_{sekundar} &= \frac{U_{out}}{2\pi \times f \times B \times S} = \frac{5}{2\pi \times 1000 \times 0,4 \times 0,7168 \times 10^{-4}} \\ &= 27,754 \text{ závitů} \end{aligned} \quad (42)$$

Na sekundárním vinutí bude navinuto 28 závitů.

Dále je potřeba vypočíst průřez vodiče, kterým bude realizováno vinutí. Pro výpočet průřezu vinutí se použije proudová hustota $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$, protože je vinutí lépe chlazeno. Vinutí se bude dimenzovat na 1 A .

$$d = \sqrt{\frac{4 \times I}{\pi \times J}} = \sqrt{\frac{4 \times 1}{\pi \times 2,5}} = 0,7136 \text{ mm} \cong 0,71 \text{ mm} \quad (43)$$

Výsledný průřez vinutí bude realizován drátem o průměru $0,7 \text{ mm}$ s PVC kvůli provlékání drátu toroidem, aby nedošlo k poškození lakovaného drátu. Trafo bude navinuto v poměru 2:1. Předpokládá se, že tento vzorek byl používán ve spínacím zdroji, tudíž bude konstruován na pracovní frekvenci v řádech kHz. Oranžové vinutí má 56 závitů a bílé oranžové vinutí má 28 závitů, černým proužkem je označen začátek vinutí.

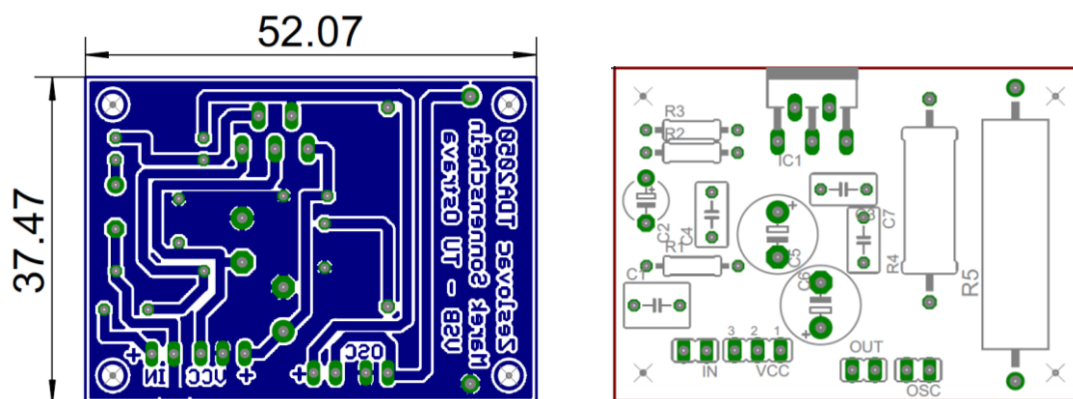
5 REALIZACE NAVRŽENÉHO PŘÍPRAVKU PRO LABORATORNÍ VÝUKU

V této kapitole bude popsána realizace navržených bloků. Nejprve byly dané navržené bloky realizovány na nepájivém poli, poté následovalo ověření funkčnosti jednotlivých bloků na tomto nepájivém poli. Dále, pokud jednotlivé bloky fungovaly správně na celém pracovním rozsahu, následovalo ověření všech bloků najednou. Tyto bloky byly mezi sebou navzájem propojeny i se vzorky traf. Když byly jednotlivé bloky propojeny a dohromady fungovaly správně, následovala část realizace návrhu DSP v programu EAGLE ver. 6.3.0.

Byly navrženy jednotlivé desky pro jednotlivé bloky. Při návrhu desky byly součástky rozmístěny tak, aby výkonné prvky měly kolem sebe prostor pro cirkulaci vzduchu. Při dalším návrhu DSP byl kladen nárok na celkovou velikost přípravku. Všechny desky byly navrženy v EAGLU a vyrobeny fotocestou. Po následném odleptání byly všechny desky ponořeny do stříbrící lázně. Fotosenzitivní jednostranný plošný spoj 150x100x1,5 mm, síla mědi CU 1x35 μm , materiál dielektrika: cuprexit, FR4. Stříbrící lázeň AG-1 zlepšuje a prodlužuje pájitelnost, stabilizuje elektrické parametry a zvyšuje protikorozi odolnost.

Při osazování všech desek byly nejprve osazeny pasivní součástky. Nakonec byla deska osazena aktivními prvky, které jsou citlivé na statickou elektřinu. Všechny desky budou umístěny na neprůhledné plexisklo o síle 5 mm a shora překryty průhledným plexisklem.

5.1 Zesilovač DSP

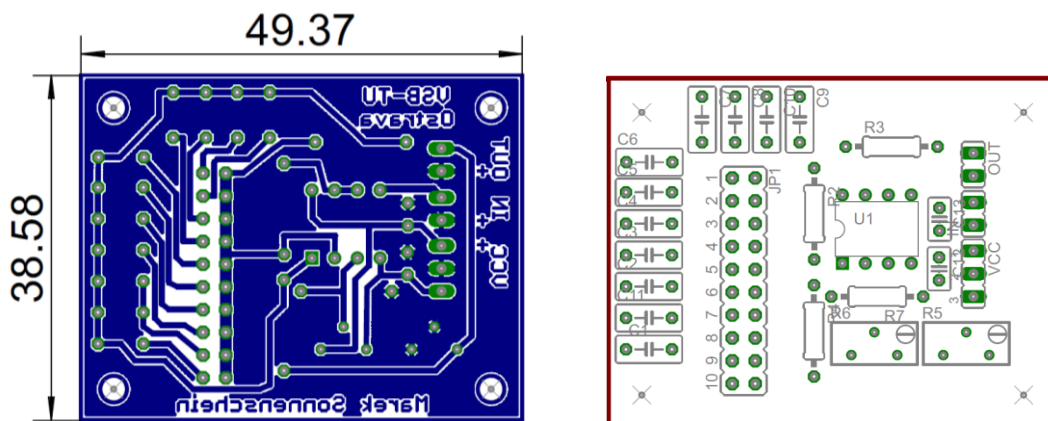


Obr. 5.1 DSP zesilovač TDA 2050 a osazovací plán DSP

Návrh DSP zesilovače byl maximálně minimalizován a přizpůsoben rozměrům pro podkladové plexisklo. Deska má rozlitou zem z toho důvodu, aby bylo co nejvíce potlačeno rušení. Dále byly na desku umístěny keramické kondenzátory. Ty byly pro odrušení umístěny co nejbližše integrovanému obvodu. Vstup IN byl vyveden na čelní plexisklo na BNC konektor, do kterého se zapojí laboratorní generátor, označení tohoto vstupu bude IN. Výstup OSC bude vyveden na čelní plexisklo na BNC konektor, ze kterého se bude snímat intenzita magnetického pole H [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]. Označení výstupu bude

Osc. X. Výstup OUT bude pomocí kabelu vyveden z čelní strany a bude sloužit pro připojení primární části vinutí vzorku traf.

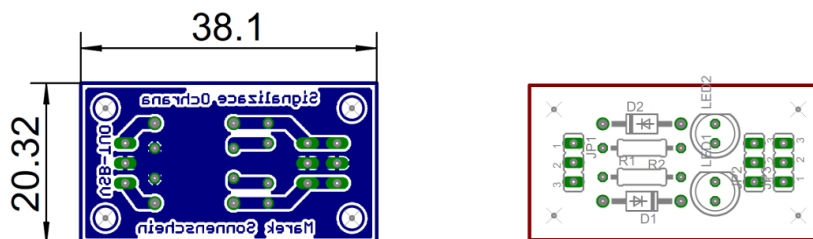
5.2 Integrátor DSP



Obr. 5.2 DSP integrátor a napěťový sledovač a osazovací plán

Při návrhu DSP byl kladen důraz na to, aby bylo možno měnit, na oboustranném kolíku JP1, hodnoty integrační konstanty pro daný frekvenční rozsah a to pomocí zkratovací propojky. Tato deska bude umístěna pod horním krycím plexisklem s popisy pro jednotlivé integrační konstanty. V krycím plexisklu bude obdélníkový otvor pro zapojování zkratovací propojky. Výstup OUT bude vyveden na čelní krycí plexisklo, kde bude BNC konektor. Označení výstupu bude Osc. Y. Z tohoto výstupu budeme snímat magnetickou indukci B [T]. Vstup IN bude vyveden na čelní plexisklo pomocí kabelu a bude sloužit k připojení sekundárního vinutí vzorku trať.

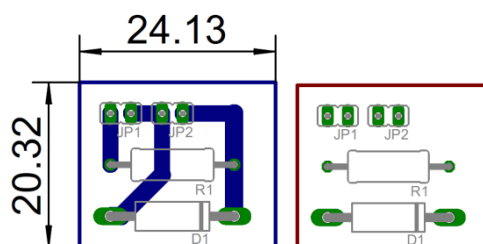
5.3 Signalizace- Ochrana DSP



Obr. 5.3 DSP signalizace ochrana a osazovací plán

Deska bude umístěna na spodním černém plexisklu. Umístění desky bylo provedeno tak, aby signalizační led diody jsou dobře viditelné. JP1 bude vyvedeno na krycí plexisklo na zdířky plus, minus a gnd.

5.4 DSP pro napájení ventilátoru

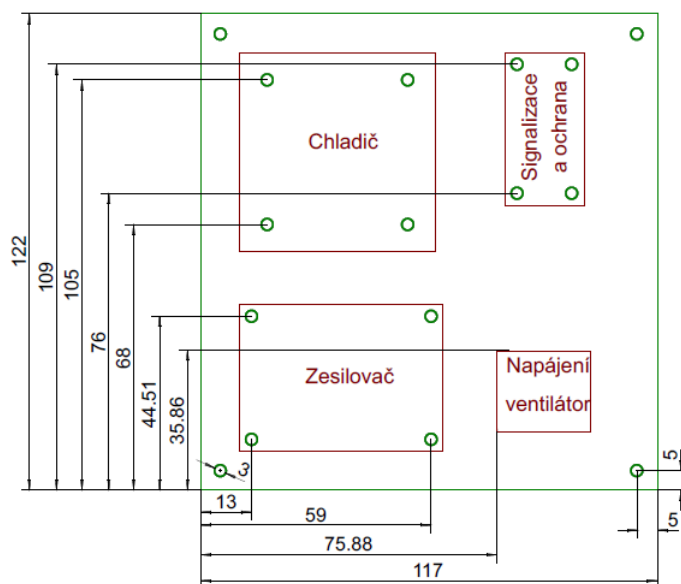


Obr. 5.4 DSP pro napájení ventilátoru a osazovací plán

DSP bude připevněna oboustrannou lepicí páskou ke spodnímu plexisklu a bude umístěna pod integrátozem. Součástky D1 i R1 byly osazeny výše nad DSP kvůli lepšímu chlazení.

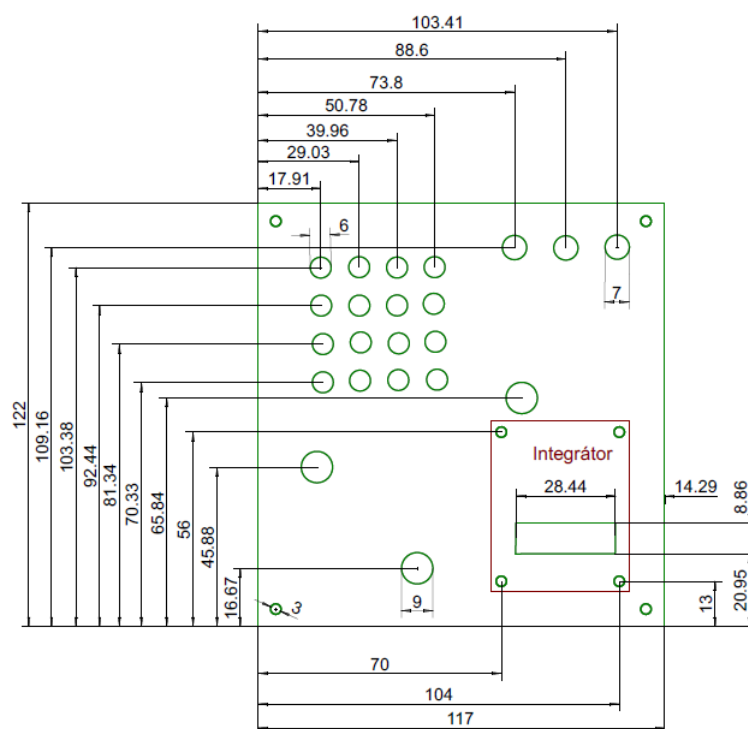
5.5 Návrh kostry

Jako podkladová deska bude použito plexisklo o síle 5 mm, na kterém budou umístěny všechny bloky pomocí šroubů M3 a distančních sloupků. V rozích budou dlouhé distanční sloupky 40 mm. Pro připevnění všech ostatních DSP budou použity distanční sloupky 10 mm kromě DSP pro napájení ventilátoru, která bude připevněna oboustrannou lepicí páskou, kvůli ušetření místa.



Obr. 5.5 Základová deska přípravku

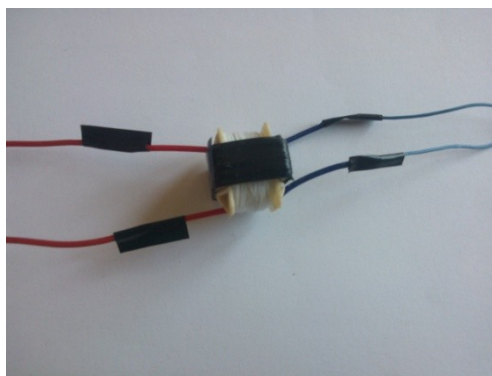
Na Obr. 5.5 je základní deska. Zeleně je obrys plexiskla a díry pro šrouby. Červené jsou obrysy jednotlivých DSP.



Obr. 5.6 Přední krycí plexisklo

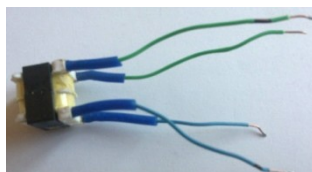
Na předním krycím plexiskle (Obr. 5.6) budou připevněny všechny vstupy a výstupy, dále větrací otvory nad chladičem a obdélníkový otvor pro zkratovací propojku nad integrátorem.

5.6 Realizace navržených traf



Obr. 5.7 Realizovaný vzorek 1 z tafoplechů tvaru EE

Na Obr. 5.7 je realizované trafo. Červené dráty označují primární vinutí drátem o průměru 0,1 mm. Začátek vinutí je označen černým proužkem. Sekundární vinutí je označeno modrými dráty. Začátek vinutí je opět označen černým proužkem. Při realizaci bylo primární vinutí od sekundárního vinutí odděleno izolační páskou. Sekundární vinutí bylo také odizolováno.



Obr. 5.8 Realizovaný vzorek 2 z železoprachového jádra tvaru EE

Trafo bylo navinuto lakovaným drátem o průměru 0,2 mm. Primární vinutí bylo označeno modrými dráty. Začátek vinutí byl označen černým proužkem. Sekundární vinutí je označeno zeleným drátem a začátek vinutí je označen opět černým proužkem. Při realizaci tohoto vzorku se díky konstrukci jádra nemusela provádět izolace primárního vinutí od sekundárního vinutí. Jádro je slepeno k sobě, což zkomplikovalo namotání závitů. Navinuté vinutí bylo následně odizolováno.



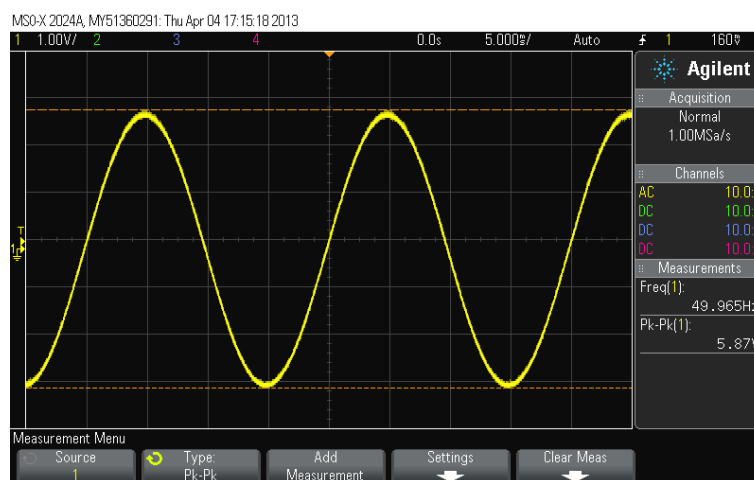
Obr. 5.9 Realizovaný vzorek 3 z feritovým toroidním jádrem

Oranžovým drátem bylo realizováno primární vinutí s 58 závity o průměru vodiče 0,7 mm. Bílo oranžovým drátem bylo navinuto 28 závitů jako sekundární vinutí. Začátky vinutí jsou označeny černým proužkem. Při navinutí závitu byl k fixaci drátu k jádru použit provázek. Vinutí bylo rozprostřeno rovnoměrně po celé ploše toroidu.

6 OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ REALIZOVANÉHO MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU

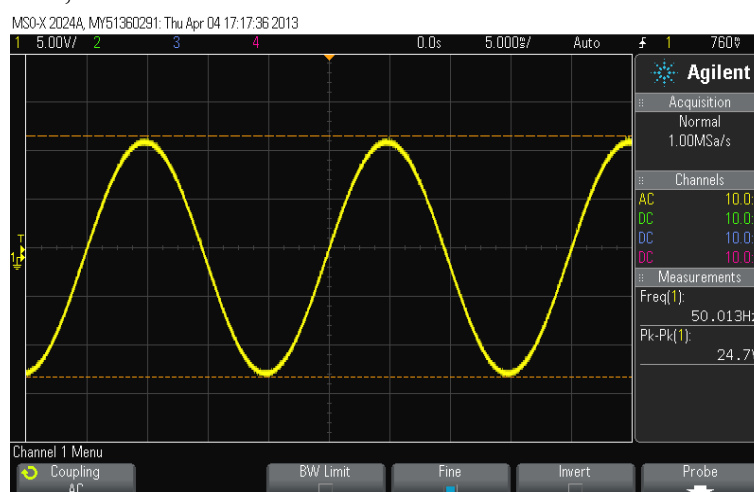
6.1 Testování zesilovače

Zesilovač byl otestován samostatně tak, že výstup byl zatížen odporem $39\ \Omega$ a z tohoto odporu bylo snímáno napětí pomocí osciloskopu. Laboratorním generátorem byl generován signál o frekvenci 50 Hz až 100 KHz s amplitudou 100 mV až 400 mV. Cílem bylo ověření funkce na celé pracovní frekvenci od 50 Hz do 100 kHz.



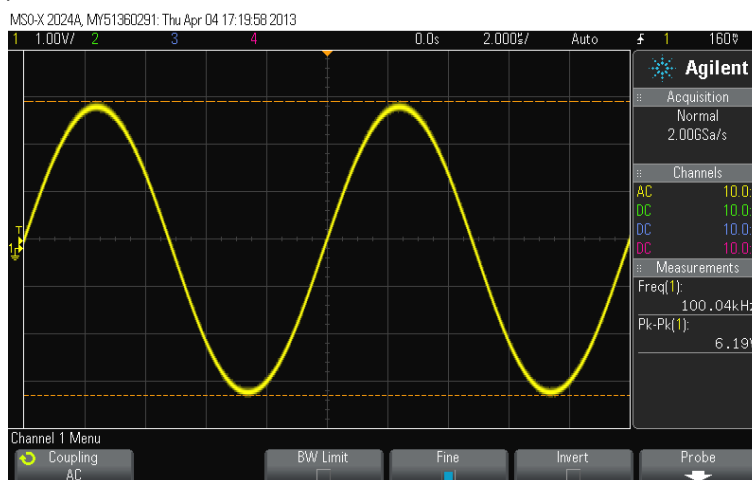
Obr. 6.1 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 100 mV a 50 Hz

Z průběhu na Obr. 6.1 je vidět, že frekvence 50 Hz je zesílена správně, neboť průběh je čistý. Do zesilovače byl generován signál o amplitudě 100 mV a frekvenci 50 Hz a výstupem je signál o frekvenci 50 Hz a amplitudě 5,87 V.



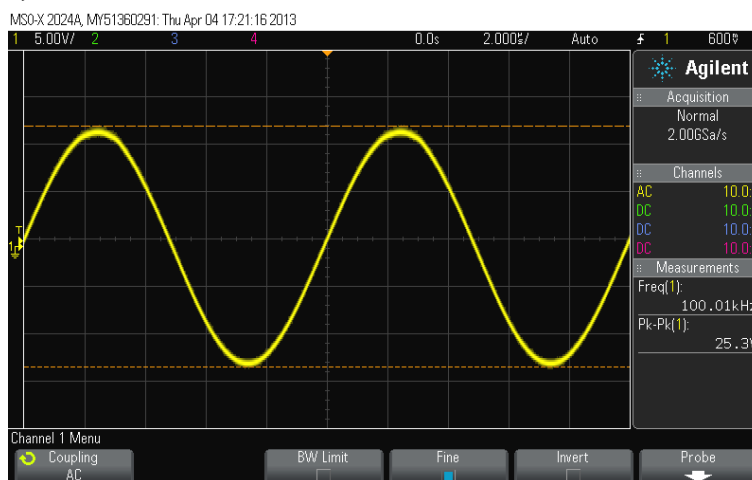
Obr. 6.2 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 400 mV a 50 Hz

Z Obr. 6.2 je vidět, že frekvence 50 Hz je zesílena opět správně, neboť průběh je čistý. Do zesilovače byl generován signál o amplitudě 400 mV a frekvenci 50 Hz. Výstupem je signál o frekvenci 50 Hz a amplitudě 24,7 V.



Obr. 6.3 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 100 mV a 100 kHz

Z Obr. 6.3 je vidět, že frekvence 100 kHz je zesílena správně, neboť průběh je čistý. Do zesilovače byl generován signál o amplitudě 100 mV o frekvenci 100 kHz a výstupem je signál o frekvenci 100 kHz a amplitudě 6,19 V.



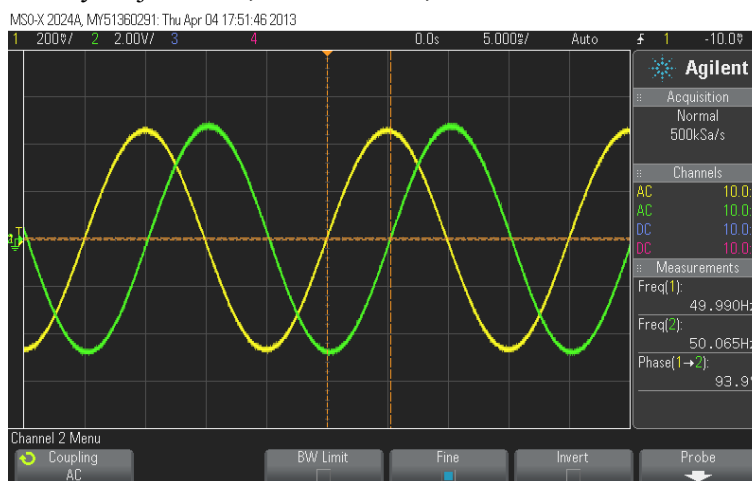
Obr. 6.4 Výstupní signál ze zesilovače při vstupním signálu 400 mV a 100 kHz

Z průběhu na Obr. 6.4 lze pozorovat, že frekvence 100 kHz je zesílena správně, neboť průběh je čistý. Do zesilovače byl generován signál o amplitudě 400 mV o frekvenci 100 kHz a výstupem je signál o frekvenci 100 kHz a amplitudě 25,3 V.

Na všech záznamech je vidět, že navržený zesilovač funguje, správně na celém pracovním pásmu od 50 Hz do 100 kHz. Dále se bude pro zesilovač využívat vstupní napětí o amplitudě 100 mV až 400 mV. Při větší amplitudě, díky napájecímu napětí, dochází ke zkreslení výstupního signálu.

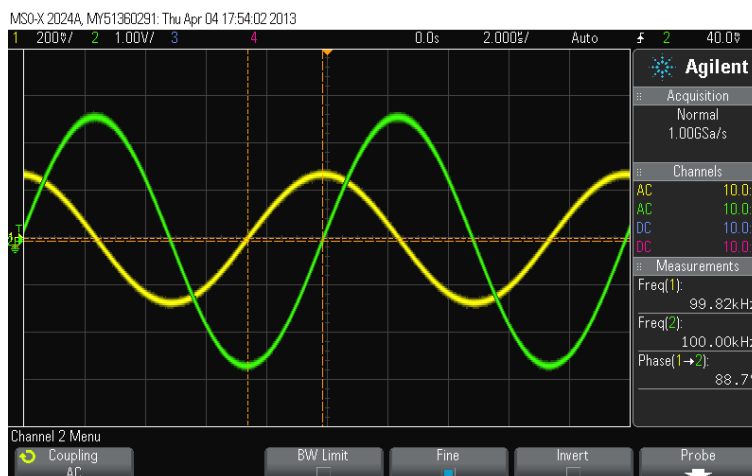
6.2 Testování Integrátoru

Integrátor byl otestován v celém pracovním rozsahu od 50 Hz až do 100 kHz, kde se měnila integrační konstanta. Na vstup integrátoru byl generován sinusový signál z laboratorního generátoru o dané amplitudě. Cílem bylo ověřit funkci integrátoru, který v reálném případě má generovaný sinus integrovat a tento integrovaný signál bude mít posunutí o 90° . Ideální je se k tomuto posunu přiblížit co nejvíce. Rozsah konstanty K_i je od 106,38 do 227 272,73.



Obr. 6.5 Zelený vstupní signál do integrátoru a žlutý výstupní signál z integrátoru při 50 Hz a 10 V

Na Obr. 6.5 lze vidět, že zelený vstupní signál, který je generovaný z laboratorního generátoru, má oproti výstupnímu signálu fázový posun o $93,9^\circ$. Zelený signál má amplitudu 10 V a frekvenci 50 Hz. Pomocí konstanty $K_i = 106,38$, která je nastavena na DSP pomocí zkratovací propojky, bylo docíleno co nejpřesnější integrace. Žlutý průběh má dostatečný fázový posun, průběh je čistý a pro náš účel plně dostačující.

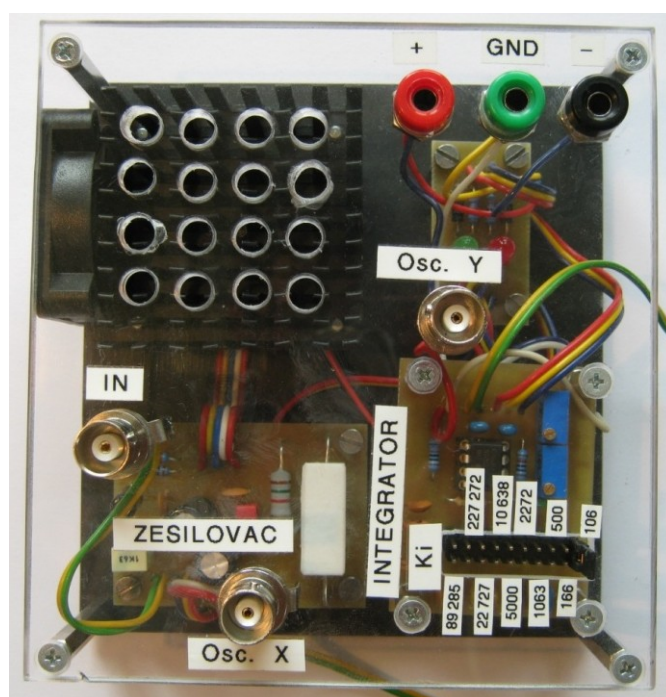


Obr. 6.6 Zelený signál je vstupní o amplitudě 5 V a 100 kHz, žlutý signál je výstupní signál z integrátoru

Z Obr. 6.6 jde vypořadovat, že oba dva signály mají stejnou frekvenci a nejsou zarušeny. Fázový posun se blíží 90° při nastavené konstantě K_i ($K_i = 227\,272,73$), která má dostatečnou strmost integrace pro frekvenci signálu 100 kHz. Daný poslední rozsah konstanty je tedy pro tuto frekvenci dostačující.

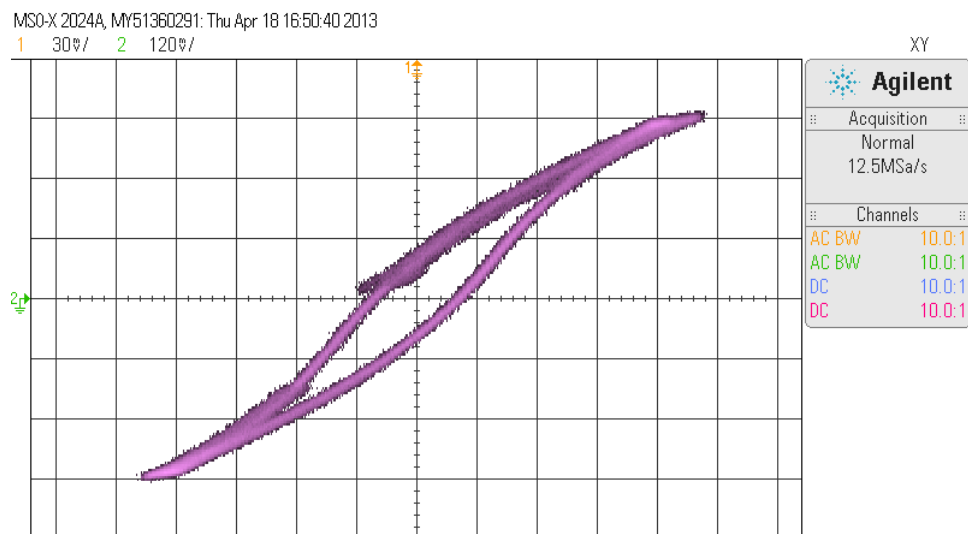
6.3 Testování celého přípravku pro měření hysterézní smyčky

Navržený a realizovaný přípravek byl dále testován. Při testování se sledovala celková funkčnost přípravku a zobrazení hysterézní smyčky pro dané vzorky. Dále bylo podle tvaru hysterézní smyčky určeno, o jaké jádra se jedná a jakou mají maximální magnetickou indukci a maximální intenzitu magnetického pole. Dále bylo určeno, zda se jedná o magneticky měkký nebo tvrdý materiál. Byla určena také remanentní (zbytková) magnetická indukce B_r a H_k koercitivní intenzita magnetického pole.



Obr. 6.7 Hotový přípravek

6.3.1 Měření hysterézní smyčky trafoplechů tvaru EE pomocí osciloskopu



Obr. 6.8 Hysterézní smyčka trafoplechů tvaru EE při 200 Hz

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 400 mV a frekvenci 200 Hz, signál byl zesílen na 24,6 V. Na první pohled je vidět (Obr. 6.8), že jde o magneticky měkký materiál. Prozrazuje to úzká hysterézní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterézní smyčky. Při zobrazení hysterézní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 166,66$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku	$N_1 = 800$ závitů
Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 270$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,03$ m
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,3528 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 30 \text{ mV} = 0,03 \text{ V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 120 \text{ mV} = 0,12 \text{ V}$
Konstanta na odporovém děliči R4 a R5	$k = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$

Hodnota napětí U_b , se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k hodnotě H_{max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 4,5 \times 0,03 = 0,135 \text{ V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{800 \times 0,135}{0,03 \times 8,2} = 439,0244 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b , se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = div \times x = 0,8 \times 0,03 = 0,024 V$$

Výpočet koercitivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{800 \times 0,024}{0,03 \times 8,2} = 78,0487 A \times m^{-1}$$

Hodnota napětí U_a , se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = div \times y = 3 \times 0,12 = 0,36 V$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 300 \times 10^{-9} \times 0,36}{0,3528 \times 10^{-4} \times 274} = 0,737375 T$$

Hodnota napětí U_a , se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = div \times y = 0,6 \times 0,12 = 0,072 V$$

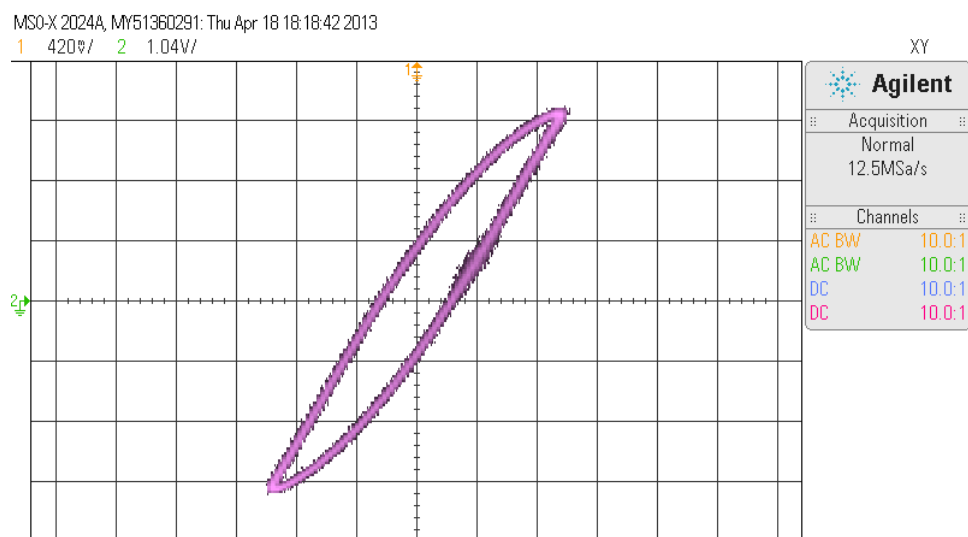
Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 300 \times 10^{-9} \times 0,072}{0,3528 \times 10^{-4} \times 274} = 0,147475 T$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost a propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita nám určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_0 \times H} = \frac{0,737375}{1,2566 \times 10^{-6} \times 439,0244} = 1336,604$$

6.3.2 Měření hysterézní smyčky železoprachového jádra tvaru EE pomoci osciloskopu



Obr. 6.9 Hysterézní smyčka železoprachového jádra při 3kHz

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 400 mV a frekvenci 3 kHz, signál byl zesílen na 24,6 V. Na první pohled je vidět (Obr. 6.9), že jde o magneticky měkký materiál. Prozrazuje to úzká hysterézní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterézní smyčky. Při zobrazení hysterézní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 10\,638,296$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku	$N_1 = 133$ závitů
Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 133$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \, \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,028 \, \text{m}$
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,12 \times 10^{-4} \, \text{m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 420 \, \text{mV} = 0,42 \, \text{V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 1,04 \, \text{V}$
Konstanta na odporovém děliči R4 a R5	$K = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k hodnotě H_{max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 2,5 \times 0,42 = 1,05 \, \text{V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{133 \times 1,05}{0,028 \times 8,2} = 608,232 \, \text{A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b se vypočetla, tak že byl spočítán počet dílků k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 0,6 \times 0,42 = 0,252 \text{ V}$$

Výpočet koercitivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b , parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{133 \times 0,252}{0,028 \times 8,2} = 145,9756 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 3,2 \times 1,04 = 3,328 \text{ V}$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 4,7 \times 10^{-9} \times 3,328}{0,12 \times 10^{-4} \times 133} = 0,646833 \text{ T}$$

Hodnota napětí U_a , se vypočetla, tak že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 1 \times 1,04 = 1,04 \text{ V}$$

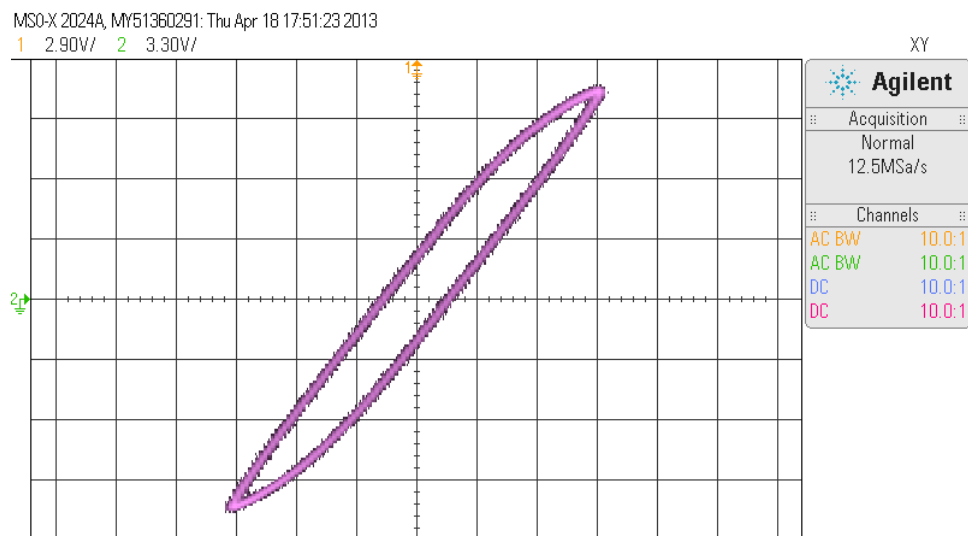
Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 4,7 \times 10^{-9} \times 1,04}{0,12 \times 10^{-4} \times 133} = 0,202135 \text{ T}$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost, propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_o \times H_{max}} = \frac{0,646833}{1,2566 \times 10^{-6} \times 608,232} = 846,3029$$

6.3.3 Měření hysterézní smyčky toroidního jádra pomocí osciloskopu



Obr. 6.10 Hysterézní smyčka toroidního jádra při 1 kHz

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 500 mV a frekvenci 3 kHz. Amplituda 500 mV byla nastavena z toho důvodu, aby bylo možno jádro více vybudit na úkor zkreslení smyčky. Smyčka se tímto více roztáhla. Na první pohled je vidět (z Obr. 6.9), že jde o magneticky měkký materiál. Naznačuje to úzká hysterézní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterézní smyčky. Při zobrazení hysterézní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 22\,727,273$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku	$N_1 = 58$ závitů
Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 28$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \, \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,08042 \text{ m}$
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,7168 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 2,9 \text{ V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 3,3 \text{ V}$
Konstanta na odporovém děliči R_4 a R_5	$K = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_{max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 3,1 \times 2,9 = 8,99 \text{ V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{58 \times 8,99}{0,08042 \times 8,2} = 790,696 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 0,5 \times 2,9 = 1,45 \text{ V}$$

Výpočet koercitivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{58 \times 1,45}{0,08042 \times 8,2} = 127,532 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{\max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 3,5 \times 3,3 = 11,55 \text{ V}$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále byla použita konstanta k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{\max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 2,2 \times 10^{-9} \times 11,5}{0,7168 \times 10^{-4} \times 28} = 0,83197 \text{ T}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 0,8 \times 3,3 = 2,64 \text{ V}$$

Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále byla použita konstanta k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 2,2 \times 10^{-9} \times 2,64}{0,7168 \times 10^{-4} \times 28} = 0,190992 \text{ T}$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost, propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{\max}}{\mu_0 \times H_{\max}} = \frac{0,83197}{1,2566 \times 10^{-6} \times 790,696} = 837,3385$$

6.3.4 Srovnání všech vzorků

Tab. 6.1 Výsledky naměřených parametrů jednotlivých jader

	Trafoplechy tvaru EE	Železoprachové jádro varu EE	Toroidní jádro
B_{\max} [T]	0,737375	0,646833	0,83197
B_r [T]	0,147475	0,202135	0,190992
H_{\max} [A. m ⁻¹]	439,0244	608,232	790,696
H_k [A. m ⁻¹]	78,0487	145,9756	127,532
μ_r	1336,604	846,3029	837,3385

Všechny vzorky se řadí do skupiny magneticky měkkých materiálů. Naznačuje to úzká hysterézní smyčka a malá hodnota H_k (koercitivní intenzita magnetického pole) a jejich vlastnost snadno se zmagnetovat.

Vzorek 1 je z transformátorových plechů tvaru EE, zhotovených z křemíkové oceli. Tento vzorek je zkonstruován tak, že byly tenké plechové díly naskládány za sebe do jádra. Tyto plechy musí být od sebe elektricky izolované, jinak by se mohly projevit ztráty vířivými proudy. Pro dosažení saturace lze transformátorový plech sytit do 1 T. Permeabilita trafoplechů je obvykle v rozmezí 2000 až 5000. Při kmitočtech nad 100 Hz jsou ztráty v jádře velmi vysoké a stávají se tak více omezujícím faktorem než například hodnota nasycení. Vzorek se v tomto případě nepodařilo vybudit na 1 T, ale pouze na hodnotu 0,737 T, což mohlo být způsobeno chybějícími plechy nebo malým stáhnutím plechů k sobě. Intenzity magnetického pole $H = 439,0244 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ bylo dosaženo velkým primárním proudem. Malá hodnota $B_r = 0,147475 \text{ T}$ a $H_k = 78,0487 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ vypovídá o tom, že daný vzorek je z magneticky měkkého materiálu.

Vzorek 2 je železoprachové jádro, které je vyrobeno ze směsi pryskyřice a železných magnetických zrn. Prachová jádra jsou vyráběna z různých slitin kovů, například permalloy. Permeabilita je závislá na obsahu železa ve směsi. Permeabilita železoprachového jádra je nízká, díky pryskyřici, jež má větší magnetický odpor než železo. Hodnota permeability se pohybuje v rozmezí 2 až 100. Pro železoprachová jádra je typická hodnota sycení 0,5 T. U měřeného vzorku bylo naměřeno 0,646 T, což lze považovat za správné sycení jádra a následně správné zobrazení hysterézní smyčky. Malá hodnota $B_r = 0,202 \text{ T}$ a $H_k = 145,9756 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ vypovídá o tom, že daný materiál je magneticky měkký. Intenzita magnetického pole byla naměřena až $608,232 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Vzorek 3, toroid s feritovým jádrem, je v dnešní době nejhojněji využíván ve spínaných zdrojích. Hodnota nasycení feritů bývá okolo 0,3 až 0,4 T. U feritových jader nejčastěji používaných u výkonových zdrojů při 25 kHz bude třeba hlídat indukci, aby nepřesáhla hodnotu 0,15 T, a při 100 kHz hodnotu 0,05 T. Důležitá je také velikost jádra. Daný vzorek byl měřen pouze na frekvenci 1 kHz, přičemž předpoklad byl 25 kHz z důvodu vysokého sycení $B_{\max} = 0,813 \text{ T}$. Bylo dosaženo hodnoty $H_{\max} = 790,696 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ díky nejvyššímu primárnímu proudu.

7 VYTVOŘENÍ ÚLOH PRO MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY FEROMAGNETIKA POMOCÍ OSCILOSKOPU

7.1 Cíl měření

Naučit se zobrazit hysterézní smyčku, jako základní charakteristiku feromagnetických materiálů, na osciloskopu.

Naučit se měřit základní charakteristické parametry feromagnetických materiálů jako jsou H_k , B_r , μ_r .

7.2 Zadaní

Úkolem je změřit hysterézní smyčku pro dané feromagnetické materiály pomocí osciloskopu. Při zobrazení si studenti vyzkouší vliv nastavení různých hodnot integračního členu RC na tvar smyčky.

U správně zobrazené hysterézní smyčky si vyznačí hodnoty zbytkového magnetismu (remanence) B_r a koercitivní síly H_k .

Dále studenti určí velikost měřítka horizontální a vertikální osy a poté stanoví co nejpřesněji hodnotu koercitivní síly H_k a remanence B_r . Vypočítají relativní permeabilitu pro dané vzorky.

V závěrečném hodnocení uvedou důvody zkreslení hysterézní smyčky při nevhodně zvolené časové konstantě integračního članku. Dále určí, o jaké magnetické materiály se jedná.

8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření přípravku pro měření hysterézní smyčky pomocí osciloskopu. Druhým úkolem bylo vytvoření laboratorní úlohy a průvodu k laboratorní úloze. Na začátku práce popisují fyzikální zákony, které je potřeba nastudovat a pochopit jejich návaznost. Po nastudování daných oblastí jsem přistoupil k návrhu a realizaci přípravku pro měření hysterézní smyčky.

Při návrhu jednotlivých bloků a schémat jsem vycházel z nastudované odborné literatury. Dalším krokem bylo navržení konkrétních konečných návrhů schémat a DSP pro dané bloky.

Pro každý blok bylo nutné vybrat správné součástky s co nejlepšími parametry a nejnižší cenou. Použil jsem integrovaný zesilovač typu TDA2050. Úkolem tohoto bloku je dodávat dostatečný budicí proud, který bude protékat primárním vinutím a vybudí daný vzorek. TDA 2050 je schopen dodávat výkon až 32 W při 4 Ω zátěži. Zesilovač má nastavené zesílení na 33,35 dB. Výstupní napětí si můžu regulovat pomocí laboratorního generátoru a to od 0 V do 26,7 V.

Dalším blokem je integrátor s napěťovým sledovačem. V tomto bloku jsem použil integrovaný obvod TL072, který má ve svém pouzdře dva integrované zesilovače. Zesilovač B jsem použil na realizaci napěťového sledovače, který má zesílení 1, tudíž signál nezesiluje, ale pouze odděluje funkci primárního vinutí od integrátoru. Napěťový sledovač má vysoký vstupní odpor. Operační zesilovač A jsem použil na stavbu aktivního integrátoru, který má lepší vlastnosti než pasivní integrátor. Důležitým úkolem integrátorů je integrovat napětí tak, abych dostal veličinu úměrnou magnetické indukci. Nastavení integrace se provádí pomocí zkratovací propojky. Velikost kondenzátoru a odporu nám určuje integrační konstantu K_i . K_i určuje strmost integrace.

Menším blokem je deska, jež slouží k úpravě napětí z 15 V na 12 V pro aktivní chlazení výkonového zesilovače. Chlazení je realizováno pomocí malého ventilátoru 40x40x10 mm, který zabezpečuje dostatečnou cirkulaci vzduchu na chladiči.

DSP signalizace a ochrana slouží k tomu, aby nedošlo k přepólování napájecího napětí. To jsem realizoval pomocí usměrňovacích diod. Pokud totiž dojde k přepólování, hrozí okamžité zničení integrovaných obvodů. Dále jsem jako signalizaci zapnutého stavu použil dvě LED diody.

Zobrazení hysterézní smyčky je díky mému přípravku mnohem jednodušší s využitím zobrazovacího režimu XY. K získání intenzity magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$] potřebujeme znát hodnotu budicího proudu, který si můžeme převést na napětí a snímat ho pomocí osciloskopické sondy. Intenzita magnetického pole bude na ose X. Pro změření magnetické indukce B [T] budeme snímat integrované sekundární napětí opět pomocí osciloskopické sondy. Magnetická indukce bude na ose Y.

Můj navržený přípravek je schopen realizovat měření různých traf. Je limitován pouze pracovními frekvencemi 50 Hz až 100 kHz a maximálním výkonem 32 W, který je schopen dodat výkonový zesilovač. Přesnost při fotografickém snímání charakteristiky je 5 %.

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Elektrotechnická měření*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 256s. ISBN 80-7300-022-9.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody: ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1.vyd. Brno: VUTIM, 2011. 564s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika III*. 5.vyd. Praha: Informatorium, 2005. 291s. ISBN 80-7333-045-8.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 248s. ISBN 80-86056-91-0.
- [5] HAVLÍK, Ladislav. *Osciloskopy a jejich použití*. 1.vyd. Praha: Sdělovací technika, 2002. 254s. ISBN 80-901936-8-4.
- [6] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2002. 271s. ISBN 80-7232-171-4.
- [7] BEJČEK, Ludvik; ČEJKA, Miroslav; REZ, Jiří. *Měření v elektrotechnice* [online]. [cit. 15. 11. 2012]. Dostupné z URL: www.vkafa.wz.cz/eltech/Mereni_v_elektrotechnice.pdf.
- [8] Černý, O. *Měření feromagnetických materiálů* [online]. Laboratorní cvičení, SPŠE v Plzni [cit. 15. 8. 2012]. Dostupné z URL: www.kotous.xf.cz/fero.doc.
- [9] *Permanentní magnety* [online]. Magnety a teorie, Sinomag ve Světlé Hoře [cit. 15. 10. 2012]. Dostupné z URL: www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf.
- [10] GESCHEIDTOVÁ, Eva a kol. *Měření v elektrotechnice – návody k laboratorním cvičením*. 1.vyd. Brno: VUT, 1992. 127s. ISBN 80-214-0442-6.
- [11] FAJT, Václav; HAASZ, Vladimír; SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření*. 1.vyd. Praha: Ostravské tiskárny, 1992. 237s. ISBN 7544.
- [12] KREJČÍ, Vladimír. *Elektrotechnické měřicí přístroje a měření I*. 5.vyd. Praha: SNTL, 1967. 272s. ISBN 5122.

- [13] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače – 2. Díl Integrované výkonové zesilovače*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 96s. ISBN 80-7300-053-9.
- [14] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 248s. ISBN 80-86056-91-0.
- [15] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 536s. ISBN 80-7300-049-0.
- [16] KREJČÍŘ, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1997. 351s. ISBN 80-86056-02-3.
- [17] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody: ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdové elektrotechnice*. 1.vyd. Brno: VUTUM, 2011. 564s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [18] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1999. 393s. ISBN 80-86056-49-x.
- [19] FUKÁTKO, Tomáš; FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplota a chlazení v elektronice II*. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 120s. ISBN 80-7300-199-3.
- [20] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektrotechnice*. 5.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 496s. ISBN 80-7300-059-8.

10 PÍLOHY

10.1 Seznam součástek

Seznam součástek pro zesilovač		
R1,3	22K	2x
R2	680	1x
R4	1k5/2W	1x
R5	8,2/5W	1x
C1	1u/63V svitkový	1x
C2	22u/35V radiální elektrolyt	1x
C3,4	100n/63V keramické	2x
C5,6	220u/35V radiální elektrolyt	2x
C7	100p/63V svitový	1x
IO1	TDA2050	1x

Seznam součástek pro integrátor		
R2	20k	1x
R3	100K	1x
R4	3K3	1x
R5	2k trimr Cermentový	1x
R6	100k trimr Cermentový	1x
R7	100k	1x
C1	470n/63V keramický	1x
C2, 11	150n/63V keramický	2x
C3	100/63V keramický	1x
C4	47n/63V keramický	1x
C5	22n/63V keramický	1x
C6	10n/63V keramický	1x
C7	4,7n/63V keramický	1x
C8	2,2n/63V keramický	1x
C9	560p/63V keramický	1x
C10	220p/63V keramický	1x
C12,13	100n/63V keramické	2x
IO	TL072	1x
JP1	Oboustranný kolík XINYA	1x
	Zkratovací propojka	1x

	SOKL 8	1x
--	--------	----

Seznam součástek pro blok signalizace- ochrana a pro blok napájení ventilátoru		
R1,2	1K5	2x
D1, 2	1N4007	2x
LED1	L-53GD	1x
LED2	L-53LID	1x
D1	KZ260/12	1x
R1	220R/1W	1x
FAN	40x40x10 sunon 12V	1x

Seznam součástek konstrukce	
BNC	3x
Fotocuprexit 75x100x1,5 jednovrstvý	1x
SBZ GREEN	1x
SBZ BLACK	1x
SBZ RED	1x
Šrouby M3	18x
Matice M3	18x
Plexisklo 117x122x5 mm	2x
Chladič 50x50x20	1x
FBK14H	1m

10.2 Průvod k laboratorní úloze

MĚŘENÍ HYSTERÉZNÍ SMYČKY FEROMAGNETIKA POMOCÍ OSCILOSKOPU

1.1 Cíl úlohy

Prostřednictvím této laboratorní úlohy se naučíte:

- Zobrazit hysterézní smyčku, jako základní charakteristiku feromagnetických materiálů, na osciloskopu
- Měřit základní charakteristické parametry feromagnetických materiálů (H_k , B_r , μ_r)
- Rozlišit zda daná jádra jsou magneticky měkké nebo tvrdé materiály
- Pracovat s osciloskopem a laboratorním funkčním generátorem
- Pracovat s nepájivým polem

1.2 Zadání

1. Změřte hysterézní smyčku daných vzorků. Správně zobrazenou charakteristiku $B = f(H)$ uložte na flash disk.
2. Ze získaných výsledků měření vypočtete B_{max} , B_r , H_{max} , H_k , a μ_r pro všechny vzorky.
3. Z tvaru hysterézních smyček určete, zda se jedná o magneticky měkký či tvrdý materiál.

1.3 Předpokládané znalosti

Pro tuto úlohu se vyžaduje nastudování:

- Tvary hysterézních smyček
- Vzhled plně zobrazené hysterézní smyčky
- Popis hysterézních smyček

Zaměřte svoji pozornost na následující témata:

- Osciloskop režim XY
- Laboratorní generátor

1.4 Použité vybavení

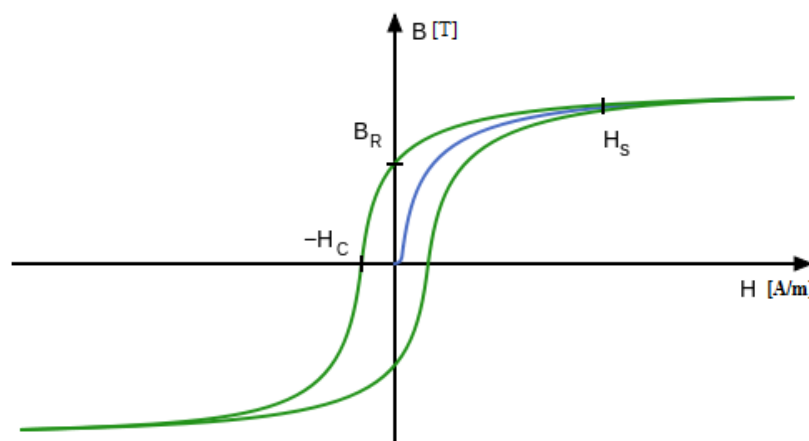
- Osciloskop Agilent MSO – X 2024A, s. č. MY51360291
- Generátor Agilent 3322A, s. č. MY44031408
- Zdroj DIAMETRAL typ P230R51D, v. č. 2031

- Přípravek pro měření hysterézní smyčky
- Nepájivé pole
- Vzorky traf- jádro z trafoplechů tvaru EE, železoprachové jádro tvaru EE, toroidní jádro

1.5 Teoretický rozbor

Závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H ; určuje vlastnosti feromagnetické látky. Lze na ní vyznačit bod B_R , tzv. remanentní magnetickou indukci (zbytkový magnetismus), která v materiálu zůstane po skončení magnetování. K jejímu potlačení musí být materiál magnetován v opačném směru intenzitou H_k , která se nazývá koercitivní intenzita (koercitivita). Oba tyto parametry jsou měřítkem magnetické tvrdosti (měkkosti) daného feromagnetického materiálu. Plocha hysterézní smyčky je úměrná ztrátám vznikajícím při přemagnetizaci, tzv. ztrátám hysterézním. Úzkou hysterézní smyčku mají materiály magneticky měkké, širokou materiály magneticky tvrdé.

Osciloskop musí být nastaven pro práci v režimu X-Y. Protože osciloskop je citlivý na napětí a ne na proud, nemůžeme jím měřit magnetizační proud přímo, ale prostřednictvím snímacího rezistoru jej převedeme na napětí, které přivedeme na vstup X osciloskopu. Tento snímací rezistor R_s je zapojen v primárním obvodu měřeného transformátoru.

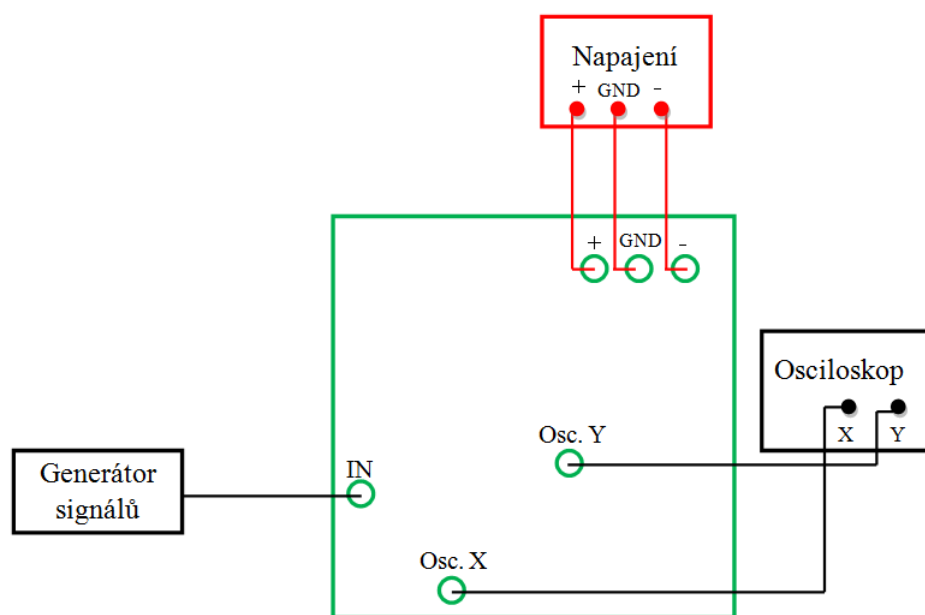


Obr. 1: Hysterézní smyčka

1.6 Pracovní postup

Postup k bodu č.1 zadání

- 1) Na laboratorním zdroji si nastavte 15 V na části A i B, dále propojte vnitřní svorky, – z části A s + na části B, tím vytvoříte symetrické napájení. Proud na části A i B nastavte na půl otáčku což je cca omezení na 1 A.
- 2) Zapojte měřicí řetězec podle schématu:



Obr. 10.1 Měřicí blokové schéma zapojení

- 3) Na generátoru si budete nastavovat a měnit amplitudu v rozmezí 100 mV až 400 mV, v krajním případě může být použita i amplituda 500 mV. Tvar signálu bude sinusový a frekvenci nastavujte v rozmezí 50 Hz až 100 kHz dokud se správně nezobrazí hysterézní smyčka.
- 4) Další důležitý bod je nastavení správné integrační konstanty K_i pro danou frekvenci, ta nám určuje strmost integrace. Čím vyšší je hodnota K_i , tím vyšší je strmost integrace, volí se tedy pro vyšší frekvence.
- 5) Měření proveďte pro všechny tři dané vzorky.
- 6) Správně naměřené hysterézní smyčky uložte na flash disk a vložte do vypracované laboratorní úlohy.

1.6.2 Postup k bodu č.2 zadání

Pro jednotlivé vzorky vypočtete B_{\max} , B_r , H_{\max} , H_k , a μ_r . Přípravek pro měření hysterézní smyčky obsahuje 3 vzorky.

1 vzorek trafoplechy tvaru EE

$$N_1 = 800 \text{ závitů}$$

$$N_2 = 274 \text{ závitů}$$

$$l_s = 0,03 \text{ m}$$

$$S_{Fe} = 0,3528 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

2 vzorek železoprachové jádro tvaru EE

$$N_1 = 133 \text{ závitů}$$

$$N_2 = 133 \text{ závitů}$$

$$l_s = 0,028 \text{ m}$$

$$S_{Fe} = 0,12 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

3 vzorek toroid s železoprachovým jádrem:

$$N_1 = 58 \text{ závitů}$$

$$N_2 = 28 \text{ závitů}$$

$$l_s = 0,08042 \text{ m},$$

$$S_{Fe} = 0,7168 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Snímací rezistor pro proud tekoucí primárním vinutím je $R_s = 8,2 \Omega$

Konstanta na odporovém děliči R4 a R5 je $K = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$

Velikost rezistoru $R_2 = 20000 \Omega$, který určuje velikost K_i spolu s C1 až C11.

Výpočet velikosti kapacity C [F]:

K_i integrační konstanta

R velikost odporu $R = 20 \text{ k}\Omega$

$$C = \frac{1}{K_i \times R}$$

Výpočet velikosti napětí U_b [V]:

div počet dílku na stínítku osciloskopu

x horizontální citlivost osciloskopu

$$U_b = div \times x$$

Výpočet intenzity magnetického pole H [$A \times m^{-1}$] :

N_1 počet primárních závitů vzorku

l_s střední délka siločar vzorků [m]

R_s předřadný odpor primárního vinutí [Ω]

U_b velikost napětí na stínítku k H_{max}, H_k výstup Osc. X [V]

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s}$$

Výpočet velikosti napětí U_a [V] :

div počet dílku na stínítku osciloskopu

y vertikální citlivost osciloskopu

$$U_a = div \times y$$

Výpočet intenzity magnetického pole B [T] :

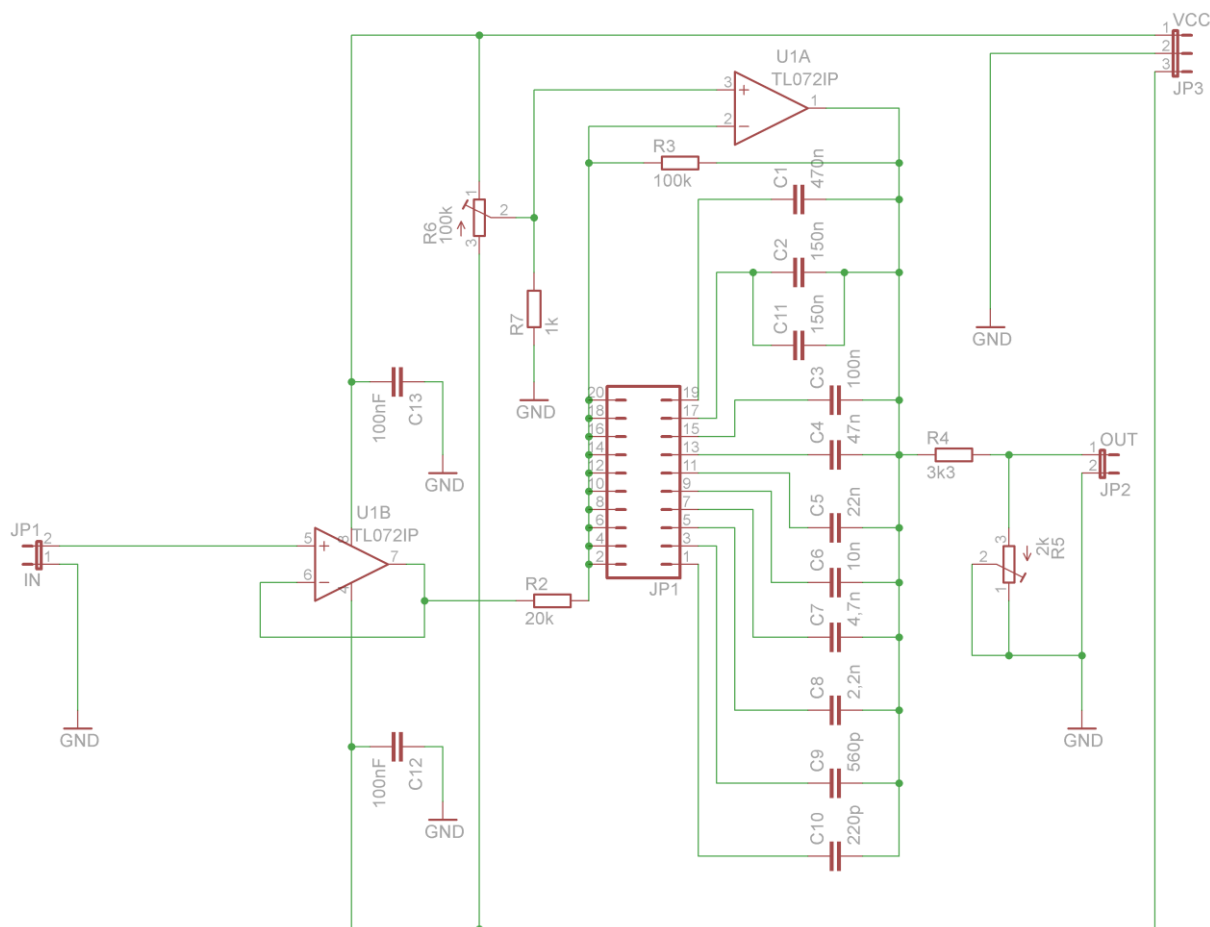
R velikost odporu, je konstantní $R=20k\Omega$

C velikost kapacity v závislosti na pozici zkratovací propojky [F]

N_2 počet sekundárních závitů vzorku

U_a velikost napětí na stínítku B_{max}, B_r výstupu Osc. Y [V]

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2}$$



Obr. 1.6 Schéma zapojení integrátoru, pro výpočty jsou důležité hodnoty R2 a C1 až C11

1.6.3 Postup k bodu č.3 zadání

Podle tvaru určete, zda se jedná o magneticky měkký či tvrdý materiál. Magneticky tvrdé materiály jsou specifické širokou hysterézní smyčkou a velkou hodnotou H_k , hůře se magnetují např. ocel s velkým obsahem uhlíku. Magneticky měkké materiály mají úzkou hysterézní smyčku malou hodnotu H_k a snadno se zmagnetují např. křemíková ocel.

1.7 Kontrolní otázky

1. K čemu slouží hysterézní smyčka?
2. Co znamená μ_r ?
3. Má průřez jádra vliv na maximální přenášený výkon trafem?
4. K čemu slouží integrátor na sekundární straně trafo?

10.3 Vzorový protokol

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Protokol o měření

Měření hysterézní smyčky feromagnetika pomocí osciloskopu

Jméno příjmení, login

Jméno příjmení, login

15.4.2013

1.1 Použité vybavení

- Osciloskop Agilent MSO – X 2024A, s. č. MY51360291
- Generátor Agilent 3322A, s. č. MY44031408
- Zdroj DIAMETRAL typ P230R51D, v. č. 2031
- Přípravek pro měření hysterézní smyčky
- Nepájivé pole
- Vzorky traf, jádro tvaru EE- vzorek 1, jádro tvaru EE- vzorek 2, toroidní jádro- vzorek 3

1.2 Popis měření

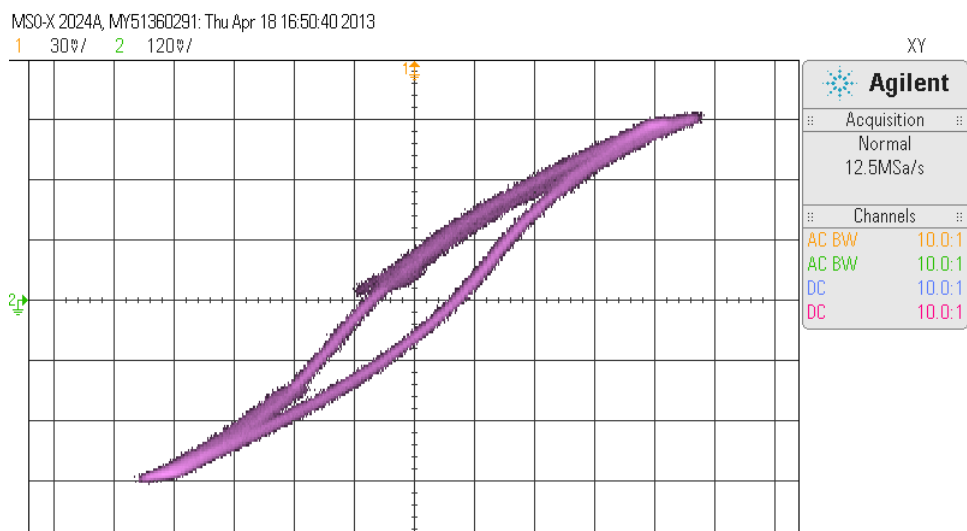
Nejdříve jsme zapojili měřicí obvod podle schématu v zadání. Dříve, než jsme připojili napěťový zdroj, nastavili jsme na něm napětí 15 V na části A i na B. Volič proudového omezení jsme přitom nastavili na cca 1 A to je půl otáčky. Teprve po zkontrolování zapojení učitelem jsme napěťový zdroj připojili k měřicímu obvodu. Postupně změříme jednotlivé vzorky traf. Nejprve zapojíme všechny přístroje dle schématu a začneme měřit jednotlivé vzorky. Nejprve máme nastaveno 100 mV na generátoru a frekvenci 50 Hz, kterou zvyšujeme a sledujeme hysterézní smyčku, kdy se plně projeví. Spolu se zvyšováním frekvence zvyšujeme konstantu K_i . Při zapojování je třeba dbát na to, aby se nepřehodily začátky vinutí a nespletly primární vinutí a sekundární vinutí.

1.3 Výsledky měření

1.3.1 K bodu zadání 1

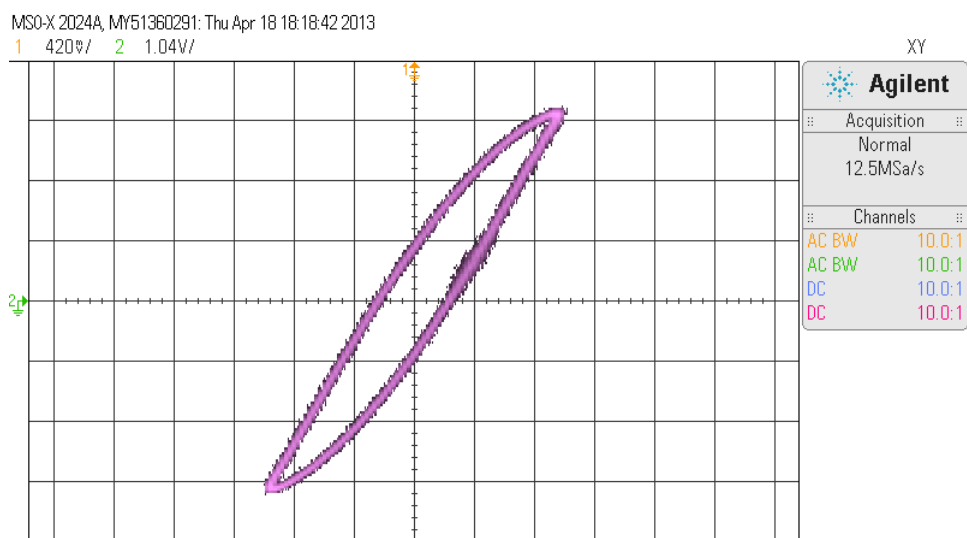
Zadáním tohoto bodu bylo změřit hysterézní smyčku daných vzorků. U správně zobrazené hysterézní smyčky $B = f(H)$, jsme měli uložit hysterézní smyčku na flash disk.

Správně zobrazená hysterézní smyčka při frekvenci 200 Hz generátoru a amplitudě 400 mV a integrační konstantě $K_i = 166,66$.



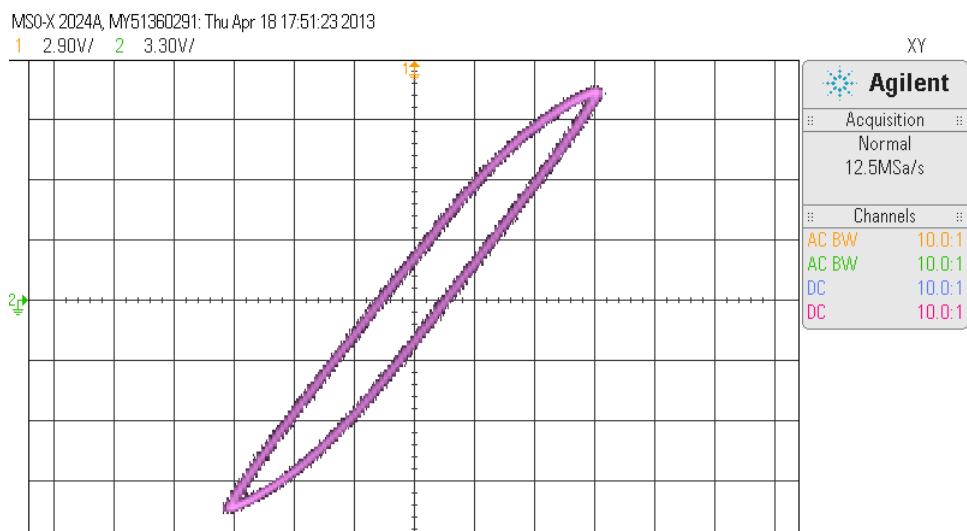
Obr. 1: Hysterezní smyčka trafo plechu tvaru EE, vzorek 1

Správně zobrazená hysterezní smyčka při frekvenci 3 kHz generátoru a amplitudě 400 mV a integrační konstantě $K_i = 10638,296$.



Obr. 2: Hysterezní smyčka železo-prachového jádra tvaru EE, vzorek 2

Správně zobrazená hysterezní smyčka při nastavené frekvenci 1 kHz na generátoru a amplitudě 500 mV a integrační konstantě $K_i = 22727,273$. Amplituda byla nastavena na laboratorním generátoru 500 mV výjimečně, protože smyčka se při nižší amplitudě plně neprojevila. Byl potřeba většího primárního proudu.



Obr.3: Hysterezní smyčka toroidního jádra, vzorek3

1.3.2 K bodu zadání 2

Ze získaných výsledků měření vypočtete B_{\max} , B_r , H_{\max} , H_k , a μ_r pro všechny vzorky.

Vzorek 1 - Měření hysterezní smyčky trafoplechů tvaru EE pomoci osciloskopu

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 400 mV a frekvenci 200 Hz, signál byl zesílen na 24,6 V. Na první pohled je vidět (Obr. 1.), že jde o magneticky měkký materiál. Prozrazuje to úzká hysterezní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterezní smyčky. Při zobrazení hysterezní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 166,66$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku	$N_1 = 800$ závitů
Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 270$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,03\text{m}$
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,3528 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 30 \text{ mV} = 0,03\text{V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 120 \text{ mV} = 0,12\text{V}$
Konstanta na odporovém děliči R4 a R5	$k = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$
Velikost kapacity ve zpětné vazbě	$C = C_{11} + C_2 = 300 \times 10^{-9} \text{ F}$
Velikost rezistoru	$R_2 = 20000 \Omega$

Hodnota napětí U_b , se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k hodnotě H_{\max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 4,5 \times 0,03 = 0,135 \text{ V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{800 \times 0,135}{0,03 \times 8,2} = 439,0244 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 0,8 \times 0,03 = 0,024 \text{ V}$$

Výpočet koercitivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{800 \times 0,024}{0,03 \times 8,2} = 78,0487 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 3 \times 0,12 = 0,36 \text{ V}$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 300 \times 10^{-9} \times 0,36}{0,3528 \times 10^{-4} \times 274} = 0,737375 \text{ T}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 0,6 \times 0,12 = 0,072 \text{ V}$$

Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 300 \times 10^{-9} \times 0,072}{0,3528 \times 10^{-4} \times 274} = 0,147475 \text{ T}$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost a propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita nám určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_0 \times H} = \frac{0,737375}{1,2566 \times 10^{-6} \times 439,0244} = 1336,604$$

Vzorek 2 - Měření hysterézní smyčky železoprachového jádra tvaru EE pomocí osciloskopu

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 400mV a frekvenci 3kHz signál byl zesílen na 24,6 V. Na první pohled je vidět (Obr. 2), že jde o magneticky měkký materiál. Prozrazuje to úzká hysterézní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterézní smyčky. Při zobrazení hysterézní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 10638,296$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku

$N_1 = 133$ závitů

Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 133$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,028$ m
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,12 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 420 \text{ mV} = 0,42 \text{ V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 1,04 \text{ V}$
Konstanta na odporovém děliči R4 a R5	$K = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$
Velikost kapacity ve zpětné vazbě	$C_7 = 4,7 \times 10^{-9} \text{ F}$
Velikost rezistoru	$R_2 = 20000 \Omega$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílku k hodnotě H_{max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 2,5 \times 0,42 = 1,05 \text{ V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{133 \times 1,05}{0,028 \times 8,2} = 608,232 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b se vypočetla, tak že byl spočítán počet dílku k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 0,6 \times 0,42 = 0,252 \text{ V}$$

Výpočet koerzivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b , parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{133 \times 0,252}{0,028 \times 8,2} = 145,9756 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 3,2 \times 1,04 = 3,328 \text{ V}$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 4,7 \times 10^{-9} \times 3,328}{0,12 \times 10^{-4} \times 133} = 0,646833 \text{ T}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla, tak že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 1 \times 1,04 = 1,04 \text{ V}$$

Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále bylo počítáno s konstantou k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 4,7 \times 10^{-9} \times 1,04}{0,12 \times 10^{-4} \times 133} = 0,202135 \text{ T}$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost, propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_0 \times H_{max}} = \frac{0,646833}{1,2566 \times 10^{-6} \times 608,232} = 846,3029$$

Vzorek 3 - Měření hysterézní smyčky toroidního jádra pomocí osciloskopu

Vzorek byl buzen zesilovačem, kde do zesilovače vstupoval signál z laboratorního generátoru o amplitudě 500 mV a frekvenci 3 kHz. Amplitudu 500 mV byla nastavena z toho důvodu, aby bylo možno jádro více vybudit na úkor zkreslení smyčky. Smyčka se tímto více roztáhla. Na první pohled je vidět (z Obr. 6.9), že jde o magneticky měkký materiál. Naznačuje to úzká hysterézní smyčka, mála hodnota B_r a H_k a dále mála plocha hysterézní smyčky. Při zobrazení hysterézní smyčky byla použita integrační konstanta $K_i = 22727,273$.

Zjištěné hodnoty:

Počet primárních závitů vzorku	$N_1 = 58$ závitů
Počet sekundárních závitů vzorku	$N_2 = 28$ závitů
Předřadný odpor primárního vinutí [Ω]	$R_5 = R_s = 8,2 \Omega$
Střední délka siločar vzorků [m]	$l_s = 0,08042$ m
Průřez jádra vzorku	$S_{Fe} = 0,7168 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Horizontální citlivost osciloskopu [V/div]	$x = 2,9 \text{ V}$
Vertikální citlivost osciloskopu [V/div]	$y = 3,3 \text{ V}$
Konstanta na odporovém děliči R_4 a R_5	$K = R_4/R_5 = 3300/1000 = 3,3$
Velikost kapacity ve zpětné vazbě	$C_8 = 2,2 \times 10^{-9} \text{ F}$
Velikost rezistoru	$R_2 = 20000 \Omega$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_{max} na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 3,1 \times 2,9 = 8,99 \text{ V}$$

Výpočet maximální intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_{max} = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{58 \times 8,99}{0,08042 \times 8,2} = 790,696 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_b se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k H_k na ose x a tato hodnota byla vynásobena horizontální citlivostí osciloskopu.

$$U_b = \text{div} \times x = 0,5 \times 2,9 = 1,45 \text{ V}$$

Výpočet koercitivní intenzity magnetického pole pomocí vypočteného U_b a parametru jádra a velikosti R_s .

$$H_k = \frac{N_1 \times U_b}{l_s \times R_s} = \frac{58 \times 1,45}{0,08042 \times 8,2} = 127,532 \text{ A} \times \text{m}^{-1}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_{max} na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = \text{div} \times y = 3,5 \times 3,3 = 11,55 \text{ V}$$

Výpočet maximální magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti C a R určuje integrační konstantu. Dále byla použita konstanta k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_{max} = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 2,2 \times 10^{-9} \times 11,5}{0,7168 \times 10^{-4} \times 28} = 0,83197 \text{ T}$$

Hodnota napětí U_a se vypočetla tak, že byl spočten počet dílků k B_r na ose y a tato hodnota byla vynásobena vertikální citlivostí osciloskopu.

$$U_a = div \times y = 0,8 \times 3,3 = 2,64 \text{ V}$$

Výpočet remanentní magnetické indukce pomocí vypočteného U_a , parametru jádra a velikosti R a C určuje velikost integrační konstanty. Dále byla použita konstanta k, která vznikla na odporovém děliči.

$$B_r = k \times \frac{R \times C \times U_a}{S_{Fe} \times N_2} = 3,3 \times \frac{20000 \times 2,2 \times 10^{-9} \times 2,64}{0,7168 \times 10^{-4} \times 28} = 0,190992 \text{ T}$$

Výpočet relativní permeability, která určuje magnetickou vodivost, propustnost pro magnetické pole. Relativní permeabilita určuje kolikrát je magnetické prostředí propustnější než vakuum.

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_o \times H_{max}} = \frac{0,83197}{1,2566 \times 10^{-6} \times 790,696} = 837,3385$$

1.3.3 K bodu zadání 3

Všechny tři vzorky mají úzkou hysterézní smyčku, to znamená, že jde o magneticky měkké materiály. Ale na první pohled je vidět, že vzorek 2 a 3 mají plochu hysterézní smyčky mnohem větší než vzorek 1, to znamená, že mají větší ztráty v jádře a hůře se magnetují. Vzorkem 3 tekla největší proud, jak je vidět na velikosti napětí na snímacím rezistoru.

1.4 Odpovědi na otázky

1) K čemu slouží hysterézní smyčka?

Hysterézní smyčka nám ukáže magnetické vlastnosti daných vzorků rychle a přehledně zjistíme, o jaký materiál se jedná. Např. se hysterézní smyčka využívá ke kontrole sváru v ocelových konstrukcích.

2) Co znamená μ_r ?

Jeto relativní permeabilita, která udává polarizovatelnost (magnetickou vodivost, propustnost pro magnetické pole). Tato fyzikální veličina vyjadřuje kolikrát je dané prostředí magneticky polarizovatelnější než vakuum. Permeabilita je bezrozměrná veličina.

3) Má průřez jádra vliv na maximální přenášený výkon trafem?

Ano má. Čím je průřez jádra větší, tím je jádro schopno přenést větší výkon.

4) K čemu slouží integrátor na sekundární straně trafo?

Integrátor slouží k integraci výstupního napětí, protože napětí na sekundárním vinutí není úměrné magnetické indukci.

1.5 Závěr

Měřením jsme zjistili, že všechny vzorky jsou z magneticky měkkého materiálu. Dále pro vybuzení jádra je potřeba trafo několikrát přetížit ať se dané ztráty zobrazí. Každý vzorek měl odlišnou smyčku, toroidní trafo (vzorek 3) bylo schopno přenést největší výkon. Vzorek 1 přenesl nejmenší výkon. Vzorek 1 byl měřen na nejnižší frekvenci 200 Hz, vzorek 2 byl měřen na nejvyšší frekvenci 3 kHz a vzorek 3 byl měřen na 1 kHz. Z toho lze usoudit, že poslední vzorek byl určen na používání při frekvenci v řádu kHz.

Norma ČSN 34 5675 "Měření magneticky měkkých materiálů" uvádí přesnost u tohoto měření 10 %, při fotografickém snímání charakteristiky 5 %. V této normě lze nalézt i další způsoby měření magnetických materiálů.